

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ГЕОФІЗИКИ ІМЕНІ С.І. СУББОТІНА

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СЕМЕНОВА
ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

Прим. № ____

УДК 550.34.01+550.347+550.34.09+550.343.4

ДИСЕРТАЦІЯ
ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ КОЛИВАНЬ ҐРУНТІВ В ЗАДАЧАХ
СЕЙСМІЧНОГО РАЙОНУВАННЯ

04.00.22 – ГЕОФІЗИКА
103 – НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

Подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Ю.В. Семенова

Науковий консультант Верпаховська Олександра Олегівна,
доктор фізико-математичних наук, провідний наук.сп.

КИЇВ – 2021

АНОТАЦІЯ

Семенова Ю.В. Фізичні параметри коливань ґрунтів в задачах сейсмічного районування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика (103 – Науки про Землю). – Інститут геофізики НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розвитку і вдосконаленню існуючих емпіричних і теоретичних основ методики сейсмічного районування територій крупних агломерацій та промислових об'єктів на території України у фізичних параметрах прогнозованих коливань ґрунту, необхідних для ефективного використання методів розрахунку сейсмічних навантажень на будинки, споруди та окремі відповідальні конструкції. Удосконалена методика дозволяє перейти від використання сейсмічної інтенсивності землетрусів в балах макросейсмічної шкали і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями до фізичних параметрів прогнозованих коливань ґрунту, при розрахунках споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу. Використання проєктувальниками амплітудних та спектральних параметрів коливань ґрунту в методах розрахунку сейсмостійкості будівель та споруд є більш коректним та обґрунтованим у порівнянні з прямими перерахунками несистемних одиниць - балів сейсмічної інтенсивності у відношенні прискорення коливань ґрунту. Прямі перерахунки, які наразі регламентуються чинними нормативними документами є фізично некоректними, оскільки прямої залежності між бальністю і параметрами коливань ґрунту не існує, що підтвердили численні результати інструментальних досліджень наслідків землетрусів. Наразі, в спектральному методі розрахунку, згідно ДБН В.1.1-12:2014, параметри, які визначають розрахункове значення горизонтального сейсмічного навантаження на будівлі та споруди повністю залежать лише від категорії ґрунту за сейсмічними властивостями і сейсмічності майданчика

будівництва в балах. З застосуванням експериментального теоретичного моделювання сейсмічної реакції моделей шаруватого ґрунту віднесено до однієї категорії за сейсмічними властивостями доведено помилковість такого підходу. Показано, що сейсмічні коливання двох моделей ґрунтової товщі, складених ґрунтами однієї категорії за сейсмічними показниками та які зондувались одним і тим же сейсмічним впливом – суттєво різняться.

Запропоновано використовувати поправочні ґрунтові коефіцієнти, які враховують інформацію про сейсмічні жорсткості шаруватої ґрунтової товщі, контрастність жорсткостей на границях між шарами та потужність осадових відкладів. Перевага цих ґрунтових коефіцієнтів полягає в тому, що їх використання дозволяє перейти до принципово нового опису взаємозв'язку властивостей ґрунту і параметрів сейсмічних впливів з використанням безперервних (не дискретних) величин. При прогнозуванні величини сейсмічних впливів такий підхід рекомендується американськими і європейськими нормативними документами, в яких замість балів інтенсивності, сейсмічні впливи описуються фізичними параметрами сейсмічних коливань ґрунту, спектрами реакції або піковими прискореннями ґрунту PGA.

Розроблено методику побудови математичних моделей шаруватого ґрунту, що описуються параметрами залежними від рівня деформації, що відповідають прийнятій типовій класифікації вимог МАГАТЕ і рекомендацій Eurocode-8 реалістичного аналізу сейсмічної реакції досліджуваної ділянки. Розроблена методика може використовуватись для таксонометричних ділянок виділених, як в межах майданчиків відповідальних споруд так і в межах більш масштабних територій.

Удосконалену методику сейсмічного районування у фізичних параметрах коливань ґрунту реалізовано на прикладі території Києва. При цьому, в межах території Києва методом сейсмо-геологічних аналогій виділено 16 таксонометричних ділянок, на яких прогнозується різний сейсмічний ефект. Для виділених таксонометричних ділянок побудовано математичні моделі

шаруватого ґрунту з параметрами непружного деформування, які дозволяють врахувати виникнення нелінійних ефектів при сейсмічних навантаженнях.

Застосовуючи чисельний аналіз сейсмічної реакції ґрунту розраховано спектральні характеристики, виділених на території Києва таксонометричних ділянок. Визначено частотні характеристики кожної таксонометричної ділянки та усереднену частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва.

Розроблено карту ґрунтових коефіцієнтів території Києва для застосування їх в методах розрахунку будівель і споруд на аварійні сейсмічні навантаження. Ґрунтові коефіцієнти отримано шляхом ділення інтегрального спектрального підсилення сейсмічних коливань ґрунтами кожної таксонометричної ділянки на середнє значення, розраховане по усередненій частотній характеристиці для ґрунтових умов території Києва. Під інтегральним спектральним підсиленням приймається площа під обвідною частотних характеристик. Розраховані ґрунтові коефіцієнти враховують контрастність зміни сейсмічної жорсткості на границях між шарами ґрунтової товщі і нелінійне деформування шаруватого ґрунту. В цьому є перевага застосування отриманих в роботі поправочних коефіцієнтів порівняно з тими, що пропонуються в держаних будівельних нормах. Використання для цілей сейсмічного захисту карти розподілу по території досліджуваного будівельного майданчика поправочних ґрунтових коефіцієнтів, замість традиційної карти сейсмічного мікрорайонування, побудованої за методом інженерно-сейсмологічних аналогій, виключає необхідність у подальшому робити штучні переходи від позасистемної сейсмічної інтенсивності до фізичних характеристик прогнозованих коливань.

В результаті теоретичного динамічного аналізу поширення сейсмічних коливань в сейсмогеологічних моделях таксонометричних ділянок Києва - виділено сейсмічно слабкі шари в ґрунтових розрізах. Виділено ґрунти, які при певному розташуванні по глибині і певній потужності проявляються, як сейсмічно слабкі прошарки з високими значеннями пікової зсувної деформації. На території Києва в розрізах фрагменту Київ М-36-ХІІІ геологічної карти

ДНВП "Геоінформ України" до таких ґрунтів віднесено моренні відклади та супісок у приповерхневому заляганні потужністю від 10 м; пісок алювіальний при потужності від 30 м. При менших потужностях у вказаних ґрунтах спостерігається різке збільшення коефіцієнта поглинання, проте без збільшення пікової зсувної деформації. Це вказує на те, що при меншій потужності вказаних ґрунтів, але при більшій амплітуді сейсмічного впливу ніж 0,06g можливо будуть спостерігатись піки зсувної деформації. Таким чином, виділено ділянки на території Києва, в розрізах яких у приповерхневому заляганні є ґрунти здатні до нелінійних проявів у більшій мірі ніж на інших ділянках і цей прояв прямо пропорційний величині падаючого сейсмічного впливу.

Визначено максимальний рівень амплітуди прогнозованих сейсмічних коливань в пікових прискореннях PGA, пікових швидкостях PGV та пікових зміщеннях PGD на поверхні (в верхньому шарі) кожної таксонометричної ділянки Києва. Проілюстровано вплив верхнього осадового шару на значення пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні. Побудовано карту сейсмічного зонування у пікових прискореннях ґрунту PGA для випадку сейсмічних впливів з максимальною амплітудою до 0,06g. Карту розподілу PGA рекомендовано використовувати в інженерних цілях додатково з розрахованими спектральними характеристиками кожної таксонометричної ділянки, оскільки високі значення PGA не є небезпечними у випадку одиничного викиду великої амплітуди, або коли частота коливання з високим значенням PGA знаходиться за межами власних частот коливань будівлі.

Розраховано спектри реакції одиничних осциляторів з 5% згасанням для кожної таксонометричної ділянки на 26 сейсмічних впливів з максимальною амплітудою до 0,06g. Встановлено сильну пряму кореляцію між значеннями пікового спектрального прискорення PSA і площею підспектральної області та слабку зворотну між абсолютною шириною спектра і площею підспектральної області. Отриманий результат вказує на те, що порівнюючи сейсмічні показники таксонометричних ділянок території Києва в загальному випадку,

більш інформативними є амплітудні параметри ніж ширина спектра. Проте, оцінити, яка з ділянок характеризується «гіршими» умовами з сейсмічної точки зору, можна лише для конкретного об'єкту. Виділено таксонометричні ділянки, що характеризуються найбільшими значеннями спектрального прискорення.

Методами теоретичного моделювання досліджено вплив зміни вологості, ущільнення наявного піску в розрізі та оголення ґрунтової товщі до корінної породи на спектральні характеристики ґрунтової товщі. Встановлено, що ущільнення піску призводить до зменшення ширини частотного діапазону підсилення коливань та перекачування енергії в більш високочастотну область, що вказує на покращення несучої здатності насипного піску як ґрунтової основи. Збільшення вологості, як глинистих так і піщаних ґрунтів, призводить до розширення спектральної області та перекачування енергії в більш низькочастотну область. Розширення спектральної області зі збільшенням вологості є більш чутливим для пісків порівняно з глинистими ґрунтами. Результати аналізу сейсмічної реакції моделей ґрунтової основи на прикладі території Ташлицької ГЕС, показали, що умовне зняття осадового шару не передбачає зменшення проявів сейсмічних ефектів при сейсмічних впливах, оскільки необхідно враховувати зміну спектрального складу відносно власних коливань конструктивного рішення.

Результати дисертаційної роботи впроваджено при оцінці сейсмічної небезпеки ряду відповідальних споруд території України. Розроблено моделі сейсмічної реакції ґрунтової основи територій розміщення відповідальних споруд Ташлицької ГАЕС, Канівської ГЕС, Запорізької АЕС, Южно-Української АЕС, Середньодніпровської ГЕС та компресорної станції «Яготин» та визначено фізичні параметри коливань шаруватого ґрунту в основі відповідальних споруд.

Ключові слова: сейсмічне районування, параметри коливань ґрунту, підсилення сейсмічних коливань, динаміка ґрунтів, моделювання сейсмічної реакції ґрунтів, пікові прискорення ґрунту.

ANNOTATION

Semenova Yu.V. Physical parameters of soil oscillations in problems of seismic zoning. The dissertation on Doctor of Physical and Mathematical Sciences, specialty 04.00.22 – Geophysics (103 – Earth sciences). – Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development and improvement of the existing empirical and theoretical foundations of the method of seismic zoning of the territories of large agglomerations and industrial facilities on the territory of Ukraine in the physical parameters of predicted soil vibrations necessary for the effective use of methods for calculating seismic loads on buildings, structures and individual critical structures. The improved technique makes it possible to switch from the use of the seismic intensity of earthquakes in points of the macroseismic scale and the category of soil in terms of seismic properties to the physical parameters of predicted soil vibrations when calculating structures for an emergency combination of loads, taking into account the seismic effect. Use by designer's amplitude and spectral parameters of soil vibrations in the methods of calculating the seismic resistance of buildings and structures is more correct and justified in comparison with direct recalculations of non-system units - points of seismic intensity in the relative acceleration of ground motions. Direct recalculations, which are now regulated by the current regulatory documents, are physically incorrect, since there is no direct relationship between the magnitude and the parameters of soil vibrations, which was confirmed by numerous results of instrumental studies of the consequences of earthquakes. Now in the spectral method of calculation, according to SBC V.1.1-12: 2014, the parameters that determine the calculated value of the horizontal seismic load on buildings and structures completely depend only on the category of soil in terms of seismic properties and seismicity of the construction site in points. With the use of experimental theoretical modeling of the seismic response of models of layered soil classified into one category according to seismic properties, the erroneousness of this approach has been proved. It is shown that the seismic

vibrations of two models of soil strata, compiled by soils of the same category according to seismic indicators and which were probed by the same seismic impact, differ significantly.

It is proposed to use soil correction factors, which take into account information on seismic stiffness of a layered soil stratum, the contrast of stiffness at the boundaries between layers and the thickness of sedimentary deposits. The advantage of these soil coefficients lies in the fact that their use allows one to proceed to a fundamentally new description of the relationship between soil properties and seismic action parameters using continuous (non-discrete) values. When predicting the magnitude of seismic effects, this approach is recommended by American and European regulations, in which, instead of intensity points, seismic effects are described by physical parameters of seismic soil vibrations, response spectra or peak ground accelerations PGA.

A method for constructing mathematical models of layered soil has been developed, described by parameters dependent on the level of deformation, corresponding to the adopted standard classification for harmonizing the IAEA requirements and Eurocode-8 recommendations for realistic analysis of the seismic response of the investigated area. The developed methodology can be used for taxonomic areas identified, both within the sites of critical structures and within larger areas.

An improved method of seismic zoning in the physical parameters of soil oscillations is implemented on the example of the territory of Kyiv. At the same time, within the territory of Kyiv, using the method of seismic-geological analogies, 16 taxonomic areas were identified, where different seismic effects are predicted. For the selected taxonomic areas, mathematical models of layered soil with inelastic deformation parameters have been built, which allow taking into account the occurrence of nonlinear effects under seismic loads.

Applying the numerical ground seismic response analysis, the spectral characteristics of the taxonomic areas identified on the territory of Kyiv were calculated. The frequency characteristics of each taxonomic area and the averaged

frequency response for the ground conditions of the territory of Kyiv have been determined.

A map of soil coefficients of the territory of Kyiv has been developed for their application in methods of calculating buildings and structures for emergency seismic loads. Soil coefficients were obtained by dividing the integral spectral amplification of seismic oscillations by the soils of each taxonomic area by the average value calculated from the averaged frequency response for the soil conditions of the territory of Kyiv. The integral spectral amplification is the area under the bypass of the frequency characteristics. The calculated soil coefficients take into account the contrast of the change in seismic stiffness at the boundaries between the layers of the soil strata and the nonlinear deformation of the layered soil. This has the advantage of using the correction factors obtained in the work in comparison with those proposed in the state building codes. The use for the purposes of seismic protection of the map of the distribution over the territory of the investigated construction site of the correction soil coefficients, instead of the traditional map of seismic microzoning, built by the method of engineering-seismological analogies, eliminates the need to further make artificial transitions from the extra-systemic seismic intensity in the physical characteristics of the predicted oscillations.

As a result of a theoretical dynamic analysis of the propagation of seismic oscillations in seismic-geological models of taxonomic areas of Kyiv, seismically weak layers in soil sections were identified. Soils have been identified, at a certain location in depth and a certain thickness, they appear as seismically weak layers with high values of peak shear strain. On the territory of Kyiv, in the sections of the Kyiv fragment M-36-XIII of the geological map of the State Research and Production Enterprise "Geoinform of Ukraine", such soils include moraine deposits and sandy loam in the near-surface bedding with a thickness of 10 m; alluvial sand with a thickness of 30 m. At lower thicknesses, a sharp increase in the absorption coefficient is observed in these soils, but without an increase in peak shear strain. This indicates that at a lower thickness of these soils, but at a greater amplitude of seismic impact than 0.06g, peaks shear strain may be observed. Thus, the areas on the territory of

Kyiv have been identified, in the sections of which, in the near-surface bedding, soils are capable of nonlinear manifestations to a greater extent than in other areas, and this manifestation is directly proportional to the magnitude of the incident seismic impact.

The maximum level of the amplitude of the predicted seismic oscillations in the peak accelerations PGA, peak velocities PGV and peak displacements PGD on the surface (in the upper layer) of each taxonomic area of Kyiv were determined. The influence of the upper sedimentary layer on the value of the peak soil acceleration PGA on the free surface is illustrated. A map of seismic zoning in peak soil accelerations PGA was constructed for the case of seismic impacts with a maximum amplitude of up to 0.06g. It is recommended to use the PGA distribution map for engineering purposes with additionally calculated spectral characteristics of each taxonomic area, since high PGA values are not dangerous in the case of a single outlier of large amplitude, or when the oscillation frequency with a high PGA value is outside the natural frequencies of the building.

The response spectra with 5% attenuation were calculated for each taxonomic area for 26 seismic movements with a maximum amplitude of up to 0.06g. A strong direct correlation was found between the peak values of the spectral acceleration PSA and the area under the spectral region, and a weak inverse correlation between the absolute width of the spectrum and the area under the spectral region. The obtained result indicates that when comparing the seismic indicators of taxonomic areas of the territory of Kyiv, in the general case, the amplitude parameters are more informative than the spectrum width. However, it is possible to assess which of the sections is characterized by “worse” conditions from a seismic point of view, it is possible only for a specific object. The taxonomic areas, characterized by the highest values of spectral acceleration, are identified.

The influence of changes in moisture content, compaction of sand in the section and outcropping of the soil layer to the bedrock on the spectral characteristics of the soil layer has been studied using the methods of theoretical modeling. It was found that the compaction of sand leads to a decrease in the width of the frequency range of amplification of oscillations and transfer of energy to a higher frequency

region, which indicates an improvement in the bearing capacity of bulk sand as a subgrade. An increase in the moisture content of both clayey and sandy soils leads to an expansion of the spectral region and the transfer of energy to a lower frequency region. The broadening of the spectral range with increasing moisture is more sensitive for sands than for clay soils. The results of the analysis of the seismic response of soil foundation models using the example of the territory of the Tashlyk PSP showed that the conditional removal of the sedimentary layer does not provide for a decrease in the manifestations of seismic effects during seismic impacts, since it is necessary to take into account the change in the spectral composition relative to the natural oscillations of the design solution.

The results of the dissertation work were introduced in assessing the seismic hazard of a number of critical structures on the territory of Ukraine. Models of the seismic response of the soil base of the critical structures of the Tashlyk pumped-storage power plant, Kanivska hydroelectric power station, Zaporizhzhia nuclear power plant, South-Ukrainian nuclear power plant, Serednyodniprovska hydroelectric power station and Yagotin compressor station have been developed, and the physical parameters of oscillations of layered soil at the base of critical structures have been determined.

Keywords: seismic zoning, ground motions parameters, amplification of seismic motions, soil dynamics, modeling of the seismic response of soils, peak ground accelerations.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Монографії:

1. Rushchitsky J., Kendzera O., **Semenova Y.** (2021) On the Seismic Waves Propagating in the Layered Earth Stratum. In: Bonali F.L., Pasquaré Mariotto F., Tsereteli N. (eds) Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht – P. 375-386 https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_21.
2. Kendzera O., Rushchitsky J., **Semenova Y.** (2021) Rheological Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of the South Ukrainian Nuclear Power Plant. In: Bonali F.L., Pasquaré Mariotto F., Tsereteli N. (eds) Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht – P. 365-373 https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_20.

Статті в наукових виданнях

3. Кендзера О.В., Вербицький С.Т., **Семенова Ю.В.**, Вербицька О.С. (2016). Стан і проблеми розвитку сейсмологічних досліджень для сейсмостійкого проектування. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 65, 83-189.
4. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2017). Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки // Світ геотехніки, 3, 4-14.
5. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2017). Деформаційні характеристики розрахункових моделей ґрунтової товщі // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 78, 17-29.
6. Дорофеев С., Егупов К.В., Егупов В.К., Кендзера А.В., Немчинов Ю.И., **Семенова Ю.В.**, Сорока Н.Н. (2017). Особенности определения нагрузок и

воздействий - на объекты повышенного класса ответственности // Наука та будівництво, 2017, 4, 11-19.

7. **Семенова Ю.В.** (2018). Моделирование реакции грунтов на сейсмичные влияния для обеспечения сейсмостойкости споруд за европейскими стандартами (за материалами научного уведомления на заседании Президиума НАН Украины 30 мая 2018 г.) // Вестник Национальной академии наук, 7, 40-47 <https://doi.org/10.15407/vsn2018.07.040>.

8. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2018). Влияние осадочной толщины на сейсмичные колебания на территории Ташлицької гідроакумуляційної електростанції – Геодинаміка, 1(24), 91-99. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.091>.

9. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.**, Вербицкий С.Т., Єгупов В.К., Лісовий Ю.В. (2019). Влияние локальных грунтовых условий на сейсмичные колебания майданчика Ташлицької ГАЕС // Наука та будівництво, 2, 11-19. DOI: 10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65.

10. **Semenova Yu.** (2019). Comparison of the simulated peak ground acceleration at different sites located close to each other. // International Research Journal, 7 (85), 44-46 <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.85.7.008>

11. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2019). Расчетные акселерограммы для прямого динамического метода определения сейсмических нагрузок // Геофизический журнал, 41(4), 210-216. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177389>.

12. Кендзера О.В., Микуляк С.В., **Семенова Ю.В.**, Скуратівський С.І. (2020). Моделирование сейсмической реакции прослойки грунта в рамках нелокальной модели суцільного середовища // Геофизический журнал, 42(3), 47-58 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204700>.

13. Kenzera O.V., Mykulyak S.V., **Semenova Yu.V.**, Skurativska I.A., Skurativskyi S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions // Геофизический журнал, 42(4), 3-17 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020.210669>.

14. **Semenova Yu.**, Kendzera O. (2020). Determination of site amplification in the South Ukrainian NPP // Norwegian Journal of development of the International Science, 1(46), 9-12.

15. Kendzera O., **Semenova Y.** (2020a). Seismic zoning of Kyiv in physical parameters of soil oscillations // Geodynamics, 2 (29), 97-106 <https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.097>.

16. Kendzera O., **Semenova Yu.** (2020b). Spectral properties of soils of the Yagotin compressor station site (Ukraine) // Sciences of Europe, 1(55), 26-30.

17. Кендзера А.В., **Семенова Ю.В.** (2021а). Вариации интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний на территории Киева. – Геофизический журнал, 1(43), 129-141. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225543>.

18. **Semenova Yu.** (2021). Modeling the influence of local soil conditions on the earthquake motion in the territory of Kyiv // Colloquium-journal, 3(90), 16-18 DOI: 10.24412/2520-2480-2021-390-16-18.

19. **Семенова Ю.В.** (2021а). Дослідження спектральних характеристик свіжонамивних пісків та ущільнених з часом пісків для оцінки їх сейсмічної стійкості // Norwegian Journal of development of the International Science, 2(55), 21-25. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-55-2-21-25.

20. **Семенова Ю.В.** (2021б). Методы учета влияния местных грунтовых условий на сейсмическую опасность строительной площадки // Sciences of Europe, 3(63), 10-14. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-63-3-10-14.

21. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2021б). Спектральне підсилення сейсмічних коливань грунтами на території Києва. - Допов. Нац. акад. наук Укр., 2, 65 - 70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.11.065>.

22. **Semenova Yu.** (2021). Seismic soil response at the base of the Srednedniprovskaaya hydroelectric power plant // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 10(5), 160-163. DOI:10.15680/IJRSET.2021.1005002.

23. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., **Semenova Yu.V.**, Skurativska A. I., Skurativskiy S.I. (2021). Seismic response of a layered soil deposit with inclusions // Геофизический журнал, 43(2), 3-13.

24. **Семенова Ю.** (2021в). Оцінка частотних коливань ґрунтової товщі території Середньодніпровської ГЕС при сейсмічних навантаженнях // Colloquium-journal, 13(100), 28-32 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-13100-28-32.

25. **Semenova Yu.** (2021). Prediction of the influence of near-surface soils on seismic surface oscillations on the example of sites of the territory of Ukraine // Journal of Research in Environmental and Earth Sciences, 7(5), 11-16.

26. **Semenova Yu.** (2021). Effect of sand consolidation in course of time on seismic properties // Journal of Applied Geology and Geophysics, 9(3), 1, 1-5 DOI:10.9790/0990-0903010105.

27. **Semenova Yu.** (2021). The influence of near-surface soils on the enhancement of seismic movements in the problem of seismic protection of nuclear power plants // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 3(5), 321-324.

28. **Семенова Ю.** (2021). Сейсмічна реакція ґрунтової товщі в основі Ташлицької гідроакumuлюючої станції на динамічні навантаження // Colloquium-journal, 14(101), 14-19 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-14101-14-19.

29. **Semenova Yu.** (2021). Seismic response of two engineering-geological sites of the Kanevskaya pumped storage power plant territory. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 8(3), 232-237 <https://doi.org/10.32628/IJSRST1218359>.

30. Kendzera, O., **Semenova, Y.** (2021). Dynamic Deformation Characteristics of Soil in the Tasks of Seismic Micro Zoning. European Journal of Environment and Earth Sciences, 2(3), 41-48. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2021.2.3.142>.

Тези доповідей:

1. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2017). Реологічні властивості геологічного середовища під будівельним майданчиком // Матеріали наукової

конференції присвяченої пам'яті Т.З. Вербицького та Ю.Т. Вербицького «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», 1-2 червня 2017р. с.м.т. Верхнє Синьовидне ÷ Львів: СПОЛОМ, 43-46.

2. Егунов К.В., Кендзера А.В., **Семенова Ю.В.**, Егунов В.К., Лесовой Ю.В. (2017). Використання сейсмологічної інформації для науково-технічного супроводу проєктування // Матеріали наукової конференції присвяченої пам'яті Т.З. Вербицького та Ю.Т. Вербицького «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», 1-2 червня 2017р. с.м.т. Верхнє Синьовидне ÷ Львів: СПОЛОМ, 58-61.

3. Кендзера А.В., Рушицкий Я.Я., **Семенова Ю.В.** (2017). Реологические модели грунтовой толи для проектирования сейсмостойких объектов // Международная научная конференция «Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии», посвященной 50-летию открытия Центральной геофизической обсерватории в г. Обнинске (г. Москва, 11–13 июля 2017 г.), 39.

4. Лісовий Ю.В., Гринь Д.М., **Семенова Ю.В.**, Вербицька О.С. (2017). Сейсмічна небезпека будівельного майданчика по бульвару Дружби Народів, 2 в м. Києві // Третя міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем», присвячена пам'яті видатним українським вченим у галузі електромагнітних досліджень: доктору фіз. -мат. наук Володимирі Миколайовичу Шуману, доктору геол. наук Сергію Миколайовичу Куліку, Київ, 3-5 жовтня 2017 р.

5. **Semenova Yu.**, Kendzera O. (2017). Influence of a soil strata with rheological properties on parameters of a seismic hazard // Abstract Book. XI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment” 11–14 October 2017, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: KNU, 1. DOI: 10.3997/2214-4609.201800093.

6. Kendzera O.V., Rushchitsky J.J., **Semenova Yu.V.** (2017). Seismicity on the territory of Ukraine and modern methods on seismic hazard parameters determination for building sites // The 2017 China (Dongguan) Internatiuonal Sciene

and Technology Cooperation Week and 1st China (International), CHINA, 8-10 December, 2017.

7. Лісовий Ю.В., **Семенова Ю.В.**, Гринь Д.М., Вербицька О.С., Амашукелі Т.А., Фарфуляк Л.В. (2018). Сейсмічне мікрорайонування будівельного майданчика в м. Києві. / Геологія і корисні копалини України: Збірник тез наукової конференції, присвяченої 100-річному ювілею Національної академії наук України та Державної служби геології та надр України (Київ, 2–4 жовтня 2018 р.) / НАН України, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка. – Київ, 2018, 265.

8. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.**, Вербицький С.Т., Єгупов В.К., Лісовий Ю.В. (2018). Вплив локальних ґрунтових умов на сейсмічні коливання майданчика Ташлицької ГАЕС // Будівництво в сейсмічних районах України : зб. тез доп. XI Всеукр. наук.- техн. конф. — Одеса: ОДАБА, 13-15.

9. Iegupov K., Kendzera A., **Semenova Yu.**, Iegupov V., Lisovyi Yu. (2018). Use of seismological information for the design of multistory buildings // 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE). - Thessaloniki, Greece, June 18-21, 2018, 1-8 <http://www.16ecee.org/>

10. **Semenova Yu.**, Kendzera O. (2018). Influence of a soil strata with rheological properties on parameters of a seismic hazard. - Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology (Vol.78, No. 3) // Materials of 11th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Session: Geophysics In Engineering Geology, Soil Science, Archaeology, 17-29. (DOI: 10.3997/2214-4609.201800093).

11. Kendzera A., **Semenova Yu.** (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, 1 – 5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902111>.

12. Kendzera O., Rushchitsky Je., **Semenova Yu.** (2019). On the seismic waves propagating in the layered Earth stratum // Abstract volume. NATO Advanced Research Workshop G5566 “Building Civil Protection Capacity to Mitigate

Geohazards in the Caucasus: A Regional Approach”, 8-10 October 2019, Tbilisi, Republic of Georgia. P.34

13. Kendzera O., Rushchitsky Je., **Semenova Yu.** (2019). Influence of a soil strata with rheological properties on seismic hazard parameters // Abstract volume. NATO Advanced Research Workshop G5566 “Building Civil Protection Capacity to Mitigate Geohazards in the Caucasus: A Regional Approach”, 8-10 October 2019, Tbilisi, Republic of Georgia. P.35.

14. **Semenova Yu.** (2019). Effect of a soil with nonlinear properties on seismic hazard parameters // AlpArray Scientific Meeting hosted by Mountain-Building in 4-Dimensions (4D-MB) Senckenberg Institut, Grüner Hörsaal, Arthur-von-Weinberg-Haus, Robert-Mayer-Str. 2, 60325 Frankfurt am Main, Germany, November 13-15, 2019.

15. **Semenova Yu.**, Kendzera A. (2020). Seismic site effects evaluation of the Yagotin compressor station (Ukraine) // Conference Proceedings, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020, 1 - 6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo091>.

16. **Semenova Yu.**, Kendzera A. (2020). Amplification Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of Sites in Ukraine // 22th International Conference on Advances in Civil and Mechanical, Singapore, Nov 19-20, 2020.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	23
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАНЬ ҐРУНТІВ У ЗАДАЧАХ СЕЙСМІЧНОГО РАЙОНУВАННЯ.....	35
1.1 Розвиток досліджень впливу місцевих ґрунтів на сейсмічний ефект	35
1.2 Формування сучасних принципів сейсмічного захисту	40
1.3. Сучасна концепція сейсмічного захисту населення та важливих об’єктів території України.....	43
1.4 Методи розрахунків споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу	47
1.5 Аналіз сучасних методів врахування впливу місцевих ґрунтових умов на сейсмічний ефект в будівельних нормах України.....	56
1.5.1 Категорії ґрунтів за сейсмічними властивостями.	56
1.5.2 Застосування спектрів реакції	61
1.5.3 Фізичні параметри коливань ґрунту в методах розрахунку на сейсмостійкість споруд.	68
Висновки до Розділу 1.....	74
Перелік використаних джерел до Розділу 1.....	76
РОЗДІЛ 2. Параметри сейсмічних коливань ґрунту для Інженерних розрахунків при сейсмостійкому проектуванні та будівництві	87
2.1 Амплітудні параметри сейсмічних коливань.....	89
2.1.1 Пікове прискорення ґрунту	89
2.1.2 Пікова швидкість ґрунту.....	92
2.1.3 Пікове зміщення	93
2.2 Тривалість коливань.....	93
2.3 Переважаючий період	95
2.4 Розрахункові акселерограми, велісограми та сейсмограми	98

2.5 Спектральний склад сейсмічних коливань	99
2.5.1 Амплітудний спектр Фур'є.....	101
2.5.2 Щільність спектра потужності.....	101
2.6 Спектри реакцій (відгуків) одиничних осциляторів	102
2.6.1 Чисельний розв'язок задачі розрахунку спектра реакції	108
2.6.2 Методика Ньюмарка-Холла використання спектрів максимальних реакцій на землетрус.....	110
2.6.3 Власне згасання спектрів реакції	114
Висновки до Розділу 2.....	116
Перелік використаних джерел до Розділу 2.....	117
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ СЕЙСМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ГРУНТУ	123
3.1 В'язкопружність та поширення сейсмічних хвиль	125
3.1.1 Напружено-деформований стан при циклічних навантаженнях	127
3.1.2 Поглинання енергії сейсмічних хвиль в'язкопружним ґрунтовим середовищем	128
3.1.2.1 Дисипація енергії та модель Кельвіна-Фойгта.....	128
3.1.2.2 Параметри опису петлі гістерезису залежності «напруження- деформація»	132
3.2 Поширення хвилі зсуву в шаруватому середовищі з врахуванням нелінійного деформування ґрунту	134
3.2.1 Аналіз сейсмічної реакції ґрунту в частотній області	134
3.2.1.1 Деконволюція.....	140
3.2.2 Аналіз сейсмічної реакції ґрунту в часовій області	141
3.2.2.1 Моделі ґрунту в комп'ютерних програмах нелінійного аналізу сейсмічної реакції	141
3.2.2.2. Метод явних кінцевих-різниць.....	144
3.3 Нелінійні параметри ґрунту залежні від деформації зсуву	149
Висновки до Розділу 3.....	153

Перелік використаних джерел до розділу 3	154
РОЗДІЛ 4. ТРАНСФОРМАЦІЯ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ В ШАРУВАТІЙ ГРУНТОВІЙ ТОВЩІ	160
4.1 Основні механізми трансформації сейсмічних хвиль в ґрунтових шарах	161
4.1.1 Приклади підсилення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами	168
4.1.2. Послаблення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами	171
4.2. Вплив тонких шарів на трансформацію сейсмічних коливань	177
4.3. Дослідження впливу зміни вологості моделей реальних ґрунтових товщ на сейсмічний ефект	179
4.5 Вплив ущільнення (консолідації) намивного та насипного піску на сейсмічну реакцію при динамічному навантаженні	181
4.6 Сейсмічна реакція ґрунтової товщі з осадовим шаром та без (модельне оголення до корінних порід).....	188
Висновки до розділу 4.....	193
Перелік використаних джерел до розділу 4	195
РОЗДІЛ 5. СЕЙСМІЧНЕ ЗОНУВАННЯ КИЄВА В ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ КОЛИВАНЬ ҐРУНТУ	201
5.1 Теоретичні засади і методи сейсмічного зонування Києва в фізичних параметрах коливань ґрунту.....	201
5.2 Таксонометричні ділянки в межах території Києва та їх сейсмогеологічні моделі.....	206
5.3 Поправочні ґрунтові коефіцієнти для території Києва.....	219
5.4 Динамічний аналіз сейсмічної реакції таксонометричних ділянок Києва	225
5.4.1 Зміна пікової зсувної деформації і коефіцієнта поглинання з глибиною	225
5.4.2 Зміна з глибиною пікового прискорення ґрунту	244
5.5. Амплітудні спектри Фур'є прискорень поверхні ґрунтової товщі таксонометричних ділянок Києва	255

5.6 Спектри реакцій (відгуків) таксонометричних ділянок Києва.....	264
Висновки до Розділу 5.....	282
Перелік використаних джерел до Розділу 5.....	285
РОЗДІЛ 6. СЕЙСМІЧНА РЕАКЦІЯ СЕЙСМОГЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ	
ГРУНТІВ В ОСНОВІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ СПОРУД.....	289
6.1. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території Ташлицької гідроакумулюючої станції	290
6.2. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС.....	304
6.3. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Южно-Української АЕС	321
6.5. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території компресорної станції «Яготин».....	340
6.6. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Канівської ГЕС.....	345
Висновки до розділу 6.....	352
Перелік використаних джерел до Розділу 6.....	353
ВИСНОВКИ.....	357
ДОДАТОК 1	362
ДОДАТОК 2	363

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

PGA – пікове прискорення ґрунту

PGD – пікове зміщення ґрунту

PGV – пікове прискорення ґрунту

P_{HA} – пікове горизонтальне прискорення

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ГАЕС – гідроакumuлююча електростанція

ДСР – детальне сейсмічне районування

ЗАЕС – Запорізька атомна електростанція

ЗСР – загальне сейсмічне районування

МАГАТЕ – міжнародне агентство з атомної енергії

РВ – реакторне відділення

СМР – сейсмічне мікрорайонування

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Інтенсивність та характер сейсмічних коливань ґрунту в основі будівлі залежать від характеристик джерела землетрусу, шляху проходження хвилі від вогнища до корінних порід та особливостей будови місцевих ґрунтових умов. Значне вибіркоче підсилення пікового прискорення ґрунту та спектрального прискорення (спектра реакції), зазвичай пояснюється фільтруючими властивостями ґрунтового середовища. Літологічний склад і фізико-механічні властивості ґрунтів в основі будинків та споруд, геоморфологічні і гідрогеологічні умови є дуже різноманітними на різних ділянках, інколи навіть в межах одного будівельного майданчика. Ці фактори обумовлюють значні відмінності в прояві інтенсивності землетрусу. Такі руйнівні землетруси, які відбулись у Мексиці (Мехіко, 1985 р.), Вірменії (Спітак, 1988 р.), Америці (Нортрідж, 1994 р.), Туреччині (Коджаелі, 1999 р.), Непалі, 2015 р. та інші, яскраво продемонстрували значний вплив особливостей місцевих ґрунтових умов на приріст амплітуди коливань, частотний склад і тривалість сейсмічних впливів, що проявилось у вибіркового руйнуванні деяких споруд, доріг та інфраструктури. Таким чином, на одному і тому ж або близько розташованих майданчиках, сейсмічні коливання можуть істотно розрізнятися переважаючими періодами і спектрами. Ступінь пошкодження будівель та споруд унаслідок впливу землетрусу залежить від амплітудно-частотних параметрів коливань ґрунту, динамічних характеристик будівлі, які визначаються її конструктивними особливостями, і від характеру взаємодії будівлі і ґрунту (Медведев, 1971).

Реакція місцевих ґрунтових умов досліджуваного експлуатаційного чи будівельного майданчика на сейсмічний вплив відноситься до основних факторів, які визначають параметри сейсмічних коливань будівлі. Останнім часом, в інженерній практиці сейсмостійкого проектування та будівництва приділяється все більше уваги дослідженням впливу місцевої геології на прогнозні параметри сейсмічної небезпеки. Це пов'язано з прогресуючим

будівництвом висотних експериментальних споруд, які зазвичай є сейсмічно вразливими, до того ж на урбанізованих територіях зі слабкими в сейсмічному відношенні ґрунтами (це долини річок, м'які осадові відклади та ін.). Раніше такі ґрунти, навіть, не розглядались в якості надійної основи. Механізми трансформації сейсмічних хвиль в таких ґрунтах є складними і важко прогнозованими. Зростаючі потреби науки і практики висувають нові вимоги та задачі, для рішення яких необхідно вдосконалювати знання і на їх базі створювати нові, більш вдосконалені методи та алгоритми. Відповідно, сучасні методи розрахунку критичних сейсмічних навантажень на будинки, споруди та окремі відповідальні конструкції потребують якомога точніших даних про сейсмічні коливання ґрунту в їх основі, що відкриває перспективу здешевлення заходів із забезпечення сейсмостійкості.

Для побудови сейсмостійкого проєкту конструкції необхідно мати реалістичні і якомога точніші кількісні параметри сейсмічних коливань ґрунту в його основі. Нині, згідно з чинними ДБН В.1.1-12:2014, розрахунки на сейсмостійкість споруд проводяться з використанням спектрального і прямого динамічного методів. Відповідно до вимог МАГАТЕ, для виконання надійного і реалістичного аналізу сейсмічної реакції, характерної для майданчика, необхідна методика співвіднесення типів ґрунтів до прийнятої типової класифікації при завданні в математичних моделях шаруватого ґрунту параметрів, залежних від рівня деформації. Оскільки такої методики наразі для типових ґрунтів території України немає, існує потреба в розробці алгоритму співвіднесення ґрунтових шарів інженерно-геологічних розрізів до типової класифікації.

Наразі, згідно з чинними будівельними нормами України, у спектральному методі використовується розрахункове значення сейсмічного навантаження на будівлі та споруди, визначене на основі інформації лише про категорію ґрунту за сейсмічними властивостями і сейсмічність майданчика будівництва в балах. Такий підхід не може давати реалістичних кількісних оцінок сейсмічного навантаження, оскільки умовні перерахунки бальності та

категорії ґрунту за сейсмічними властивостями у фізичні параметри коливань ґрунту є сейсмологічно необґрунтованими і некоректними.

На сьогодні для оцінки сейсмічних впливів у більшості країн використовуються карти сейсмічного районування в термінах амплітудних параметрів коливань ґрунту замість традиційних балів сейсмічної інтенсивності. Найточніший спосіб побудови таких карт базується на застосуванні даних інструментальних спостережень. Для території України застосування такого методу є неможливим через недостатню кількість інструментальних даних.

Отже, актуальність досліджень дисертаційної роботи обумовлена необхідністю розвитку і вдосконалення існуючих наукових і теоретичних основ методики сейсмічного районування територій крупних агломерацій та промислових об'єктів на території України у фізичних параметрах прогнозованих коливань ґрунту для ефективного використання методів розрахунку сейсмостійкості будинків, споруд та окремих відповідальних конструкцій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України за наступними науковими темами:

«Розвиток методів вивчення сейсмічності території України та оцінки параметрів сейсмічної небезпеки майданчиків важливих і екологічно небезпечних об'єктів» (2016–2021 рр., № держ. реєстрації 0116U000130);

«Моніторинг геофізичних полів з метою зниження ризиків виникнення надзвичайних ситуацій від небезпечних природних явищ» (2017–2021 рр., № держ. реєстрації 0117U000374);

«Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2014–2018 рр.» (2014–2018 рр., № держ. реєстрації 0114U000231);

«Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2019–2023 рр.» (2019–2023 рр., № держ. реєстрації 0119U000078);

«Розвиток методів вивчення сейсмічності території України та оцінки параметрів сейсмічної небезпеки майданчиків важливих і екологічно небезпечних об'єктів» (2018–2019 рр., № держ. реєстрації 0118U001918);

П-12-19: «Моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи для забезпечення сейсмостійкості споруд за європейськими стандартами» (2019 р., № держ. реєстрації 0119U000663);

«Дослідження сейсмічності території України і параметрів сейсмічної небезпеки будівельних майданчиків» (2020–2021 рр., № держ. реєстрації 0120U000190);

«Дослідження критичних явищ та інших проявів самоорганізації у структурованих геосередовищах з метою оцінки сейсмічних ризиків» (2021 р., 0118U000044);

«Оцінка сейсмічної небезпеки територій розміщення будівель і споруд значного класу відповідальності» (2021–2025 рр., № держ. реєстрації 0121U107662).

Мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження. Метою роботи є розвиток теоретичних основ і методики сейсмічного районування територій крупних агломерацій та промислових об'єктів України у фізичних параметрах прогнозованих коливань ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі підходи та виявити перспективні шляхи вирішення проблеми прогнозування амплітудних і спектральних параметрів коливань ґрунту в задачах сейсмічного районування для територій зі слабкою сейсмічністю і недостатнім забезпеченням даними інструментальних спостережень.

2. На основі аналізу опублікованих і фондкових матеріалів та результатів теоретичного моделювання дослідити вплив фільтруючих властивостей ґрунтів на динамічні характеристики сейсмічних коливань.

3. У рамках удосконалення методів розрахунку будівель і споруд на сейсмостійкість розробити теоретичні і методичні основи переходу до фізичних параметрів прогнозованих коливань ґрунту замість сейсмічної інтенсивності землетрусів в балах макросейсмічної шкали.

4. Розробити методику визначення поправочного коефіцієнта з метою ефективного застосування спектрального методу розрахунку об'єктів на сейсмічні впливи, з огляду на те, що поправочний коефіцієнт враховує фільтруючі властивості ґрунту і механізми трансформації сейсмічних хвиль у шаруватому ґрунтовому середовищі.

5. Методом сейсмогеологічних аналогій виділити таксонометричні (відносно однорідні інженерно-геологічні) ділянки в межах території Києва та побудувати математичні сейсмогеологічні моделі виділених ділянок для аналізу їх сейсмічної реакції.

6. Для території Києва побудувати карту поправочних коефіцієнтів для врахування особливостей реакції ґрунтових товщ на сейсмічні впливи різної інтенсивності.

7. Провести динамічний аналіз сейсмічних коливань у сейсмогеологічних моделях таксонометричних ділянок та виділити в них сейсмічно слабкі шари;

8. Визначити спектральний склад коливань на вільній поверхні таксонометричних ділянок та максимальний рівень амплітуди у фізичних параметрах коливань (пікових прискореннях – PGA, пікових швидкостях – PGV, пікових зміщеннях – PGD).

9. Розробити методику побудови математичних моделей коливань шаруватого ґрунту, що описуються параметрами, залежними від рівня деформації, які враховують прийняту типову класифікацію, узгоджену з рекомендаціями МАГАТЕ, для аналізу сейсмічної реакції ґрунтових

комплексів, характерних для майданчиків промислових об'єктів на території України.

10. Впровадити розроблену методику побудови математичних моделей коливань шаруватого ґрунту з врахуванням нелінійного деформування для визначення сейсмічної небезпеки ряду важливих об'єктів на території України.

Об'єкт дослідження – сейсмічні коливання ґрунтів, характерних будівельним та експлуатаційним майданчикам України.

Предмет дослідження – фізичні параметри сейсмічних коливань ґрунтів для сейсмічного районування.

Методи дослідження та достовірність і обґрунтованість отриманих результатів і висновків. При побудові математичних сейсмогеологічних моделей шаруватого ґрунту та чисельному моделюванні його сейсмічної реакції з урахуванням нелінійного деформування використані загальновідомі положення теорії в'язкопружності та теорії поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі, рішення хвильового рівняння руху в частотній області, пряме і зворотне перетворення Фур'є, еквівалентно-лінійна модель врахування емпіричних нелінійних модуля зсуву і коефіцієнта поглинання в ґрунтових шарах, залежних від зсувної деформації. Достовірність і обґрунтованість результатів і висновків забезпечується чіткою фізичною та математичною постановкою задачі, комплексним теоретичним та практичним обґрунтуванням шляхів розв'язку визначеної проблематики, дотриманням початкових умов та обмежень математичного моделювання сейсмічної реакції шаруватого ґрунту, застосуванням строгих математичних розрахунків і використанням в повній мірі емпіричних даних.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено алгоритм аналітично-емпіричної методики переходу від використання сейсмічної інтенсивності в балах і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями до фізичних параметрів коливань ґрунту в задачах сейсмічного районування для територій зі слабкою та помірною

сейсмічністю з недостатнім забезпеченням даними інструментальних спостережень. Розроблений алгоритм реалізовано на прикладі території Києва.

2. Вперше розроблено нову оригінальну методику розрахунку поправочних ґрунтових коефіцієнтів, які враховують нелінійне деформування ґрунту і зміну сейсмічних жорсткостей в шаруватому ґрунті для вдосконалення спектрального методу розрахунку будівель та споруд на сейсмостійкість;

3. Вперше виділено таксонометричні ділянки в межах Києва; для яких побудовано математичні сейсмогеологічні моделі ґрунтового розрізу з нелінійними характеристиками (кривими зменшення модуля зсуву та збільшення коефіцієнта поглинання від деформації зсуву). Визначено частотні характеристики моделей таксонометричних ділянок і розраховано усереднену частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва. Розраховано інтегральні спектральні підсилення для усередненої частотної характеристики та кожної таксонометричної ділянки.

4. Вперше виділено сейсмічно слабкі шари в ґрунтових розрізах території Києва фрагменту Київ М-36-ХІІІ геологічної карти ДНВП "Геоінформ України". До таких ґрунтів віднесено моренні відклади з включеннями супісків у приповерхневому заляганні потужністю від 10 м та прошарки, складені алювіальним піском, потужністю від 30 м. При меншій потужності ці ґрунти можна вважати потенційно сейсмічно слабкими при прогнозованих сейсмічних впливах, більших ніж 0,06g, оскільки при зондуванні сейсмічними впливами з максимальною амплітудою до 0,06g спостерігались високі значення максимального коефіцієнта поглинання, проте без високих значень деформації зсуву.

5. Вперше побудовано для території Києва карту розподілу коефіцієнта інтегрального підсилення сейсмічних коливань ґрунтами. Коефіцієнти інтегрального підсилення запропоновано використовувати в якості поправочних ґрунтових коефіцієнтів для території Києва в методах розрахунку будівель і споруд на аварійні сейсмічні навантаження. Використання поправочних ґрунтових коефіцієнтів, замість традиційної карти СМР,

побудованої за методом інженерно-сейсмологічних аналогій, виключає необхідність надалі робити штучні переходи від категорії ґрунту за сейсмічними властивостями та позасистемної сейсмічної інтенсивності до фізичних параметрів прогнозованих коливань ґрунту в методах розрахунку конструкцій на сейсмостійкість.

6. Вперше на основі розроблених алгоритмів і методик отримано розв'язки задачі сейсмічного районування території Києва у фізичних параметрах коливань ґрунту.

7. Вперше побудовано карту сейсмічного зонування Києва в пікових прискореннях ґрунту PGA для випадку сейсмічних впливів з максимальною амплітудою до 0,06g. Визначено спектральні характеристики сейсмічних коливань таксонометричних ділянок Києва. Карту розподілу PGA рекомендовано використовувати в інженерних цілях додатково з розрахованими спектральними характеристиками кожної таксонометричної ділянки. Для цього розраховано амплітудні спектри Фур'є, спектри реакції з 5% згасанням на 26 сейсмічних рухів, заданих акселерограмами, пронормованими по амплітуді до 0,06g. Виділено таксонометричні ділянки, що характеризуються найбільшими значеннями спектрального прискорення.

8. Вперше впроваджено при оцінці сейсмічної небезпеки ряду відповідальних об'єктів методика побудови математичних моделей шаруватої ґрунтової товщі, яка відповідає вимогам МАГАТЕ і враховує нелінійне деформування ґрунту. Це такі об'єкти, як: Ташлицька гідроакумуюча станція, Канівська ГЕС, Запорізька АЕС, Южно-Українська АЕС, Середньодніпровська ГЕС та компресорна станція «Яготин». Для перерахованих об'єктів визначено прогнозовані (очікувані) кількісні параметри сейсмічної небезпеки: амплітудний та спектральний склад сейсмічних коливань ґрунтів в основі відповідальних споруд.

Практичне значення отриманих результатів.

Ефективне вирішення проблеми захисту від небезпечних сейсмічних впливів є можливим лише на основі надійного встановлення закономірностей їх

прояву на конкретних майданчиках. Запропонована удосконалена методика сейсмічного районування територій крупних агломерацій та промислових об'єктів на території України в фізичних параметрах прогнозованих коливань ґрунту значно підвищить ефективність та обґрунтованість використання методів розрахунку сейсмічних навантажень на будинки, споруди та окремі відповідальні конструкції.

Розроблену методику побудови математичних моделей шаруватого ґрунту з нелінійними, залежними від рівня деформації параметрами та алгоритм розрахунку нелінійної сейсмічної реакції шаруватого ґрунту впроваджено в підрозділах ПрАТ «Укргідроенерго», НАЕК «Енергоатом», ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва», ДП «Сейсмобуд» при геофізичному забезпеченні сейсмостійкості Ташлицької ГАЕС, Кременчуцької ГЕС, Канівської ГАЕС, Середньодніпровської ГАЕС, Южно-Української АЕС, Запорізької АЕС, компресорної станції «Яготин» та інших відповідальних об'єктів.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, положення, моделі і висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Результати роботи опубліковані в 46 публікаціях у фахових виданнях в Україні та іноземних виданнях, зокрема 2 розділи в монографіях (видавництво “Springer”), 28 статей у фахових журналах та 16 тез доповідей на міжнародних конференціях. 8 робіт здобувача індексуються у наукометричній базі SCOPUS та 9 у Web of Science. Особистий внесок у наукові праці, написані в співавторстві, є наступний. У роботах [2, 4, 5, 11, 14, 30] постановка проблеми, чисельне моделювання сейсмічної реакції шаруватого ґрунту, розрахунок кількісних параметрів сейсмічних коливань на вільній поверхні та інтерпретація отриманих результатів виконані дисертантом особисто. У роботах [1, 3, 12, 13, 23] дисертанту належить формулювання постановки проблеми, теоретичне обґрунтування та аналіз результатів. У роботах [15, 17, 21] дисертантом розроблено теоретичні і методичні основи розрахунку фізичних параметрів прогнозованих коливань ґрунту для цілей сейсмічного

районування; для території Києва розраховано амплітудний та спектральний склад коливань на вільній поверхні та побудовано карту поправочних коефіцієнтів для врахування особливостей сейсмічної реакції ґрунтових товщ на сейсмічні впливи різної інтенсивності. У роботах [6, 8, 9, 14, 16] дисертантом побудовано математичні моделі коливань шаруватого ґрунту з врахуванням нелінійного деформування для об'єктів підвищеного класу відповідальності, проведено моделювання та експериментальне дослідження, розраховано кількісні параметри сейсмічної небезпеки.

Результати дисертаційної роботи відзначено державною премією Президента України для молодих вчених 2020 року.

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані на різних етапах роботи, були представлені на міжнародних нарадах, симпозиумах та конференціях:

Конференція присвячена пам'яті Т.З. Вербицького та Ю.Т. Вербицького «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», Львів, 2017; Міжнародна наукова конференція «Розвиток систем сейсмологічного і геофізичного моніторингу природних і техногенних процесів на території Північної Євразії», присвяченій 50-річчю відкриття Центральної геофізичної обсерваторії в м. Обнінськ, Москва, 2017 р.; Третя міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем», присвячена пам'яті видатним українським вченим у галузі електромагнітних досліджень: доктору фіз.-мат. наук Володимиру Миколайовичу Шуману, доктору геол. наук Сергію Миколайовичу Куліку, Київ, 2017 р.; International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment” Kyiv, 2017; The 2017 China (Dongguan) International Science and Technology Cooperation Week and 1st China (International), CHINA, 2017; Міжнародна наукова конференція, присвячена 100-річному ювілею Національної академії наук України та Державної служби геології та надр України, Київ, 2018 р.; Всеукраїнська наук. - техн. конф «Будівництво в сейсмічних районах України», 2018 р.; 16th European Conference on Earthquake

Engineering (16ECEE), Thessaloniki, Greece, 2018; 11th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Session: Geophysics In Engineering Geology, Soil Science, Archaeology, Kiev, 2018; 18th International Conference on Geoinformatics «Theoretical and Applied Aspects», Kiev, 2019; NATO Advanced Research Workshop G5566 «Building Civil Protection Capacity to Mitigate Geohazards in the Caucasus: A Regional Approach», Tbilisi, Republic of Georgia, 2019; AlpArray Scientific Meeting hosted by Mountain-Building in 4-Dimensions (4D-MB) Senckenberg Institut, Frankfurt am Main, Germany, 2019; Conference Proceedings, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, Kiev, 2020; 22th International Conference on Advances in Civil and Mechanical, Singapore, 2020.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 369 сторінках машинописного тексту, складається з анотації, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 283 сторінки. Робота ілюстрована 61 таблицею та 159 рисунками. Список використаних джерел містить 341 найменування.

Подяки. Здобувач висловлює подяку академіку НАН України, доктору фіз.-мат. наук, професору Віталію Івановичу Старостенку за всебічну підтримку.

Автор висловлює подяку своєму науковому консультанту, доктору фіз.-мат. наук Олександрі Олегівні Верпаховській за всебічну підтримку і консультації при виконанні досліджень.

Здобувач висловлює подяку члену-кореспонденту НАН України Олександровичу Володимировичу Кендзері за цінні наукові поради, корисні обговорення результатів та всебічну підтримку.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАНЬ ГРУНТІВ У ЗАДАЧАХ СЕЙСМІЧНОГО РАЙОНУВАННЯ

1.1. Розвиток досліджень впливу місцевих ґрунтів на сейсмічний ефект

З давніх часів було інтуїтивно зрозуміло, що на структурні пошкодження будівель та споруд під час землетрусів, як правило, впливають місцеві ґрунтові умови. На рис.1.1 показано розподіл сейсмічної інтенсивності в Токіо під час землетрусу Канто 1923 року [TCEGE, 1999] в якості одного з типових прикладів. Більші пошкодження спостерігались в східній області в голоценовій низовині в порівнянні з меншими пошкодженнями в плейстоценовій терасі в західній частині міста. Таким чином, зрозуміло що розподіл пошкоджень відображає відмінності в поверхневій геології [Singh et al., 1988; Aki, 1988; Matasovic, 1993; Field, Jacob, 1995; Semblat, Pecker, 2009]. Тобто локальні ґрунтові умови конкретного майданчика можуть істотно вплинути на підсилення або послаблення прояву сейсмічного ефекту [Idriss, Seed, 1968; Kausel, 1984; Castro et. al., 2004; Chopra et al, 2013; Pratt et al., 2017; Soil Dynamics...,2019; Kumar et al., 2020].

Явища підсилення сейсмічних коливань за рахунок впливу місцевих ґрунтових умов яскраво проявилися під час таких землетрусів минулого століття, які відбулися в Герреро (Мехіко, 1985 р.), у Вірменії (Спітак, 1988 р.), у США в районі затоки Сан-Франциско (Лома-Пріета, 1989 р.), в Японії (Кобе, 1995 р.), в Індії (Коджаелі, 1999 р.), (Адапазарі та Бхуджі, 2001 р.). При цих землетрусах спостерігалися ефекти суттєвого підсилення коливань місцевими ґрунтами, навіть у віддалених від епіцентру місцях (100 – 400 км). Трансформація сейсмічних коливань при поширенні від корінної породи крізь ґрунтові шари до поверхні проявляється не лише в збільшенні амплітуди коливань в верхніх шарах, при цьому змінюється також спектральний склад і тривалість коливань [Медведев, 1962; Kausel, 1974; Kramer, 1996; Building Seismic..., 1997; Tuladhar, Maki, Mutsuyoshi, 2008; Dolce, Di Bucci, 2017].

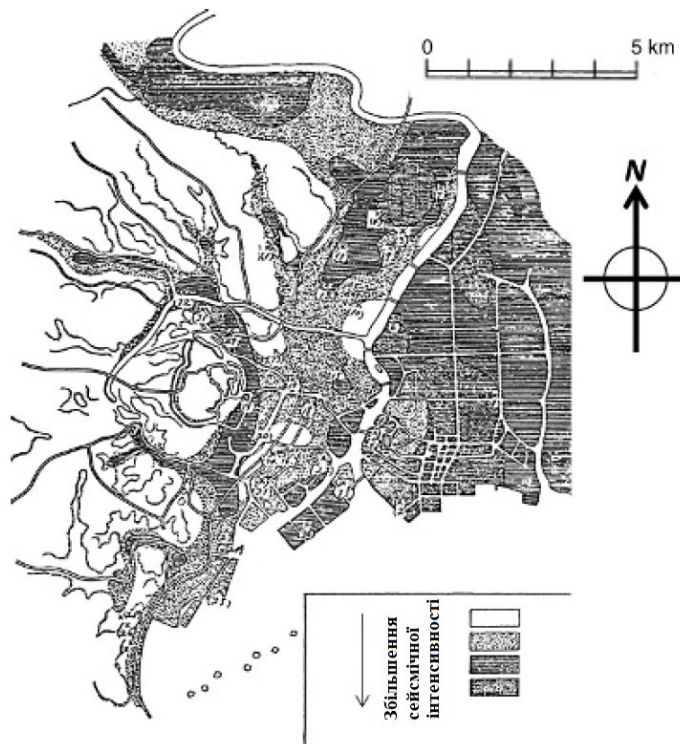


Рис. 1.1 Розподіл сейсмічної інтенсивності в Токіо під час землетрусу Канто 1923р. [TCEGE, 1999]

Перші наукові повідомлення про вплив місцевих ґрунтових умов на інтенсивність сейсмічних коливань та прояви пошкоджень та руйнувань будівель при сейсмічних навантаженнях на ділянках складених різними ґрунтами, з'явилися після землетрусу в Сан-Франциско (США, 1906 р.) [Wood, 1908]. Повідомлення про локалізацію районів, що зазнали значних пошкоджень в межах одного міста, та більшості пошкоджень будівель певної висоти в межах однієї і тієї ж місцевості під час землетрусів у Мексиці (Мехіко 1957 р.), Македонії (Скоп'є, 1963 р.) та Венесуелі (Каракас, 1967 р.) сфокусували увагу інженерної спільноти на дослідженнях питання впливу місцевих ґрунтових умов на шкоду завдану землетрусами. Наприклад, при землетрусі Лома Прієта в Каліфорнії (1989 р.) з магнітудою 7,1 найбільших пошкоджень зазнала частина Сан-Франциско, яка розташована на молодих морських глинистих відкладах. Аналіз сейсмограм показав, що порівняно з іншими ділянками амплітуди коливань на цих ґрунтах були посилені в 6 – 10 разів на частотах близько 1 Гц та в 2—3 рази на частотах 3—5 Гц. Власні частоти більшості зруйнованих 3 – 4

-поверхових будинків становили близько 3 Гц [Кендзера та ін., 2020; Boatwright et al., 1991].

Частотний склад сейсмічних коливань на поверхні ґрунтової товщі суттєво впливає на реакцію як споруди в цілому, так і окремих її конструкцій. Найнебезпечнішими є резонансні ефекти, при яких частотний склад коливань ґрунту і власні частоти структури є близькими. Першим, хто розвивав ідею використання коефіцієнтів підсилення сейсмічних коливань місцевими ґрунтами, розрахованих по записам мікросейсм на ділянках з різними ґрунтовими умовами [Gutenberg, 1927; Gutenberg, 1957] був Гутенберг. Однак, незважаючи на переконливі докази суттєвого впливу місцевих ґрунтових умов на підсилення та зміну спектра сейсмічних коливань [Idriss, Seed, 1970; Abbis, 1989; Dravinski M., 1983; Finn et al.1975; Idriss, 1990; Kokusho, Matsumoto, 1998; Kokusho, 1999; Midorikawa, 1993; Павленко, 2020; Semenova Yu., Kendzera, 2020, Semenova, 2021], положення про врахування впливу місцевої геології на сейсмічний ефект, з'явилися в будівельних нормах лише в 1970-х роках. На сьогоднішній день оцінка впливу місцевої приповерхневої геології (особливо м'яких відкладів) вже є необхідною вимогою нормативних будівельних документів більшості країн та програмах зменшення сейсмічного ризику [Federal Emergency..., 2015; Turkish Building..., 2018]. Однак різноманіття ґрунтових умов і механізмів трансформації сейсмічних хвиль в них суттєво ускладнюють задачу оцінки впливу локальних ґрунтів на сейсмічний ефект. В даний час існує багато методів оцінки впливу місцевої приповерхневої геології: експериментальні методи, емпіричні методи, розрахункові методи та статистичний аналіз існуючих акселерометричних даних. Кожний метод має свої переваги та обмеження [Kramer, 1996]. Емпіричні методи реєстрації сейсмічних подій, засновані на вивченні даних слабких або сильних рухів, записаних на ділянках з різною місцевою геологією і використанні спектральних записів коливань відносно ділянок складених твердими «еталонними ґрунтами». Однак, емпіричні методи дають гарні результати лише при використанні записів сильних рухів, оскільки записи слабких рухів

піддаються чисельним спотворенням, які пов'язані з фоновими мікросейсмами, техногенними перешкодами і апаратурними шумами [Boatwright et al., 1991; Field and Jacob 1995, Archuleta and Steidl, 1998]. До того ж записи слабких рухів не відображають нелінійні ефекти, що виникають в ґрунтах при сильних рухах. Тому емпіричні методи дають обґрунтовані оцінки лише для регіонів з високою сейсмічністю. В регіонах зі слабкою та помірною сейсмічністю ймовірність реєстрації записів максимально можливих землетрусів вкрай мала, особливо за короткий час відведений для інструментальних інженерно-сейсмологічних спостережень. Тому в цих регіонах більш широко застосовуються розрахункові методи. Головна перевага математичного моделювання (аналізу) реакції ґрунту на сейсмічні навантаження полягає у можливості аналізувати велику вибірку можливих вхідних рухів. Однак математичне моделювання вимагає вичерпного розуміння як інженерно-геологічної та геотехнічної інформації кожної досліджуваної ділянки, так і складного чисельного аналізу. Різноманіття за своїми характеристиками ґрунтових умов робить задачу вдосконалення методів математичного моделювання вкрай актуальною в концепції сейсмічного захисту населення та важливих об'єктів від землетрусів.

Початок будівництва атомних станцій в США та катастрофічні землетруси 1950-1960-их років спонукали інтенсивні дослідження поведінки ґрунтів в умовах динамічного навантаження. Почали розроблятися алгоритми і програми розрахунку сейсмічної реакції ґрунту при землетрусах; розвиватись спостереження за допомогою вертикальних сейсмічних груп. Інтенсивно почали вивчатись шаруваті ґрунтові товщі в сейсмічних районах: склад шарів, потужності, резонансні частоти, параметри підсилення сейсмічних хвиль. Проведено масштабні дослідження, результати яких відображені в збірниках численних конференцій із сейсмічного районування та локальних ефектів. Значно вдосконалено будівельні норми ряду країн в частині обліку сейсмічної реакції ґрунту при землетрусах. Для оцінки сейсмічної небезпеки почали розвиватись методи розрахунку акселерограм інтенсивних коливань з

урахуванням регіональних характеристик випромінювання і поширення сейсмічних хвиль і локальних умов в точці реєстрації.

Десятиліття з 1970-х до 2000-х років відзначаються помітно стрімким розвитком сейсмології. Помітно поліпшилися знання про вогнища землетрусів, особливості поширення сейсмічних хвиль і локальних ефектів землетрусів, пов'язаних з впливом приповерхневих ґрунтів, рельєфу місцевості, топографії внутрішніх границь і неоднорідностей середовища. Успіхи сейсмології в ці роки обумовлені розвитком в світі сейсмічних спостережень [Павленко, 2020].

Після руйнівних землетрусів 1964 р. в Анкориджі (США, $M = 9.1$) і Ніїгата (Японія, $M = 7.5$), що супроводжувалися катастрофічним розрідженням ґрунту і величезним економічним збитком, дослідження поведінки ґрунтів в умовах динамічного навантаження стали пріоритетним науковим напрямком в США, де в ті роки почалося будівництво атомних станцій. Сейсмічність території США викликала вкрай загрозливі настрої. У роботах [Anderson, Richart, 1976; Chang et al., 1996; Hardin, Drnevich, 1972; b; Seed, Idriss, 1970; 1982; Joyner, Chen, 1975, Vucetic, Dobry, 1991; Assimaki et al., 2000; Darendeli, 2001; Darendeli et al., 2001; Delfosse Ribay, 2004; Towhata, 2008; Sahadewa, 2014; Ha Giang et al., 2017 та ін.] представлено результати лабораторних експериментальних досліджень з вивчення поведінки зв'язних і незв'язних ґрунтів при динамічному навантаженні, розвинені чисельні методи аналізу, розроблені алгоритми і програми, які і сьогодні успішно використовуються для розрахунку сейсмічної реакції ґрунту при землетрусах: програми еквівалентного лінійного аналізу SHAKE, QUAD-4, LUSH, FLUSH, FDEL та ін., нелінійного аналізу NONLI, CHARSOIL, HDCP, TESS, MASH та ін., аналізу повних і ефективних напружень DESRA, TARA та ін., програми на основі вдосконалених конституційних моделей DYSAC2, DYNAFLOW, SWANDYNE, DIANA та інші.

Після катастрофічного землетрусу 1995 року в Кобе в Японії почався розвиток щільних мереж сейсмічних спостережень. З 1996 р. в безперервному режимі ведеться реєстрація сильних рухів наземними станціями K-NET (Більше

1000 акселерометрів) і вертикальними групами KiK-net (понад 700 вертикальних груп; група складається з 2-х акселерометрів, один з яких встановлений на поверхні, а інший в свердловині на глибині 100-200 м або більше). Сейсмічні спостереження активно розвивалися і в інших країнах: в США, Тайвані, Новій Зеландії. Створювалися бази даних сильних рухів, теоретична основа для аналізу яких була створена в 1970-х роках. Алгоритми і програми розрахунку сейсмічної реакції ґрунту тестувалися по записах вертикальних груп. Досліджувалися і інші локальні ефекти землетрусів: ефекти рельєфу і внутрішніх кордонів осадових басейнів. Отримані записи показали істотний вплив ґрунтових шарів на параметри сейсмічних коливань поверхні при землетрусах.

Нові землетруси стимулювали масштабні дослідження сейсмічної реакції ґрунтових товщ для прогнозу параметрів коливань поверхні при майбутніх сильних землетрусах. Активно вивчалися осадові басейни в різних районах Японії, Тайваню, Нової Зеландії, Північної і Південної Америк, Португалії, Іспанії, Італії, Швейцарії, Франції. За записами сейсмічних шумів, слабких землетрусів і вибухів, по гравітаційним аномаліям оцінювалися коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань на різних частотах, резонансні частоти, потужності, склад і будова ґрунтових товщ, їх здатність до розрідження. Записи сильних рухів, зроблені вертикальними групами, дозволили просунути в розумінні нелінійності сейсмічної реакції ґрунту при сильних землетрусах [Павленко, 2020].

1.2. Формування сучасних принципів сейсмічного захисту

Формування теоретичного осмислення принципів сейсмічного захисту почалось порівняно нещодавно. Перші методи розрахунку і норми проектування сейсмостійких конструкцій з'явилися на початку ХХ ст., після великих землетрусів в Японії та Італії. Розрахунок на сейсмічні навантаження спочатку був дуже простим. Вважалось, що на споруду в горизонтальному напрямку діє одна десята частина його маси, і потім виконувався розрахунок на міцність.

По суті такий підхід припускав, що споруда переміщується як абсолютно тверде тіло разом з ґрунтом і, відповідно, прискорення всіх його точок і ґрунту рівні між собою. Цей підхід відбивав панівне на той час переконання, що землетрусам притаманні «повільні», більш довгоперіодні (низькочастотні) коливання ґрунту, ніж власні коливання будівель. На думку відомого японського вченого Т. Суехіро, періоди коливань ґрунту 1-2 с слід вважати переважаючими при землетрусах. Таке твердження можна пояснити частково тим, що на перших порах вимірювання при землетрусах проводилися лише сейсмографами, якими реєстрували зміщення ґрунту, і не записували прискорень. На записах зміщень (сейсмограмах) візуально виявляються довгоперіодні коливання, а на записах прискорень (акселерограмах) - коливання з короткими періодами. У перші десятиліття ХХ ст. в будівництві в Японії, а потім і в інших країнах, набула поширення концепція високої сейсмостійкості жорстких монолітних залізобетонних будівель з комірчастою структурою, що досягається великою кількістю внутрішніх стін. Періоди власних коливань таких будівель (0,1 – 0,3 с) були менші передбачуваних періодів сейсмічних коливань (1 – 2 с). І це вважалося важливим фактором їх сейсмостійкості, оскільки за таких умов виключалася можливість резонансних явищ.

Після руйнівних землетрусів 30-х років в Каліфорнії (США), Береговою і геодезичною службою цього штату була реалізована програма досліджень. Під час цих досліджень при землетрусах реєструвалися прискорення ґрунту і одночасно фіксувалися власні коливання будівель. З'ясувалося, що переважаючі періоди коливань ґрунту при каліфорнійських землетрусах відповідають діапазону 0,2 – 0,3 с, а не 1 – 2 с, як вважалося раніше. Тобто, періоди сейсмічних коливань виявилися близькими до періодів власних коливань більшості будівель заввишки в 4-5 поверхів, які і становили в ті роки основу масового будівництва. Таким чином, виникла версія про можливість резонансу і, отже, про динамічні навантаження, які в кілька разів перевищують навантаження, визначені статичним методом. Це припущення підкріплювалося

тим, що спостережені руйнування в Каліфорнії виявилися значно сильнішими ніж розрахункові. До такого ж висновку прийшли радянські фахівці після руйнівного Ашхабадського землетрусу 1948 року. Все це призвело до того, що в середині 50-х років на зміну статичному прийшов так званий динамічний метод розрахунку споруд на сейсмостійкість. Майже одночасно динамічний метод був включений як в будівельні коди США, так і офіційні будівельні норми СРСР. І хоча з тих пір самі норми неодноразово переглядалися, метод розрахунку, зазнавши ряд модифікацій, у своїй суті не змінився.

Для динамічного метода розрахунку (іноді його називають спектральним) властива важлива особливість, яка полягає у врахуванні відмінності сейсмічних прискорень ґрунту на різних періодах коливань. При цьому зі зменшенням жорсткості споруди, тобто збільшенням періодів власних її коливань, розрахункове сейсмічне навантаження може знижуватися майже в чотири рази. В результаті розрахункові навантаження на споруди, які проєктуються для різних районів з сейсмічністю від 7- до 9-балів, можуть відрізнятись в 12-14 разів за рахунок різної жорсткості будівель (різних періодів власних коливань) і сейсмічності (бальності) території. Але, успіхи вимірjuвальної сейсмології привели до розуміння того незаперечного факту, що «раз на раз не доводиться» [Айзенберг, 2018]. При землетрусах можуть переважати як довгоперіодні, так і короткоперіодні коливання. Землетруси в Скоп'є, Ташкенті, Агадирі були короткоперіодними, і руйнувалися переважно жорсткі будівлі. Землетруси в Мехіко і Бухаресті містили в спектрі інтенсивні довгоперіодні коливання з періодом 2,5 с і 1,25 с відповідно. Обстеження, проведені в Бухаресті і Мехіко, підтвердили сильну кореляцію між сейсмічними спектрами, періодами власних коливань будівель і обсягами руйнувань: тут масових руйнувань зазнали вищі і гнучкі будівлі.

На сьогоднішній день, сейсмологами прийнята позиція, що спектр сейсмічних коливань визначається двома групами факторів: з одного боку, механізмом вогнища, магнітудою землетрусу, епіцентральною відстанню, з іншого - властивостями ґрунтів. Таким чином впливає, що на одному і тому ж

або близько розташованих майданчиках, сейсмічні коливання можуть істотно розрізняються переважаючими періодами і спектрами.

1.3. Сучасна концепція сейсмічного захисту населення та важливих об'єктів території України

Досвід діяльності в галузі захисту від землетрусів в таких розвинутих країнах, як Японія, США, Канада, Франція, Італія та інших показує, що основною концепцією сейсмічного захисту повинно бути не прогнозування часу виникнення землетрусів, а впровадження сейсмостійкого проектування і будівництва житла та промислових об'єктів на базі обґрунтованих знань про кількісні параметри реально існуючої сейсмічної небезпеки в районах їх розміщення і на конкретних будівельних майданчиках [Кендзера, 2015а; Кендзера, 2015б; Кендзера, Семенова, 2018; Кендзера та ін., 2019]. Згідно цієї концепції, інвестори, власники і управляючі будинків та споруд повинні організувати захист своїх об'єктів від землетрусів самостійно, але держава, представлена центральними органами влади, повинна забезпечити їх інформацією необхідною для такого захисту.

Сучасна концепція сейсмічного захисту населення та важливих об'єктів території України базується на сейсмостійкому проектуванні нових та зміцненні існуючих будинків і споруд, здатних забезпечити мінімізацію наслідків від майбутніх землетрусів. Заходи із сейсмічного захисту на території України регламентуються «Державними будівельними нормами України» – ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014].

Сейсмічний ризик, який описує потенційні втрати при майбутньому прогнозованому землетрусі, залежить від рівня сейсмічної небезпеки майданчика розміщення об'єкту та його сейсмічної вразливості і вимірюється у відсотках або у грошових обсягах економічних втрат [Старостенко та ін., 2011].

Парадокс полягає у тому, що в районах з відносно низьким рівнем природної сейсмічної небезпеки, до яких відноситься значна частина території України, більшість споруд проектують не сейсмостійкими, внаслідок чого вони не захищені від рідких, але потенційно можливих, сейсмічних впливів (є

сейсмічно уразливими). З іншого боку, через низьку повторюваність землетрусів і відсутність достатньо густої сейсмологічної мережі на таких територіях, як правило, не існує реальних даних про можливі місцеві землетруси [Кендзера, 2015а; Кендзера, 2015б].

Таким чином, сейсмічний ризик територій із слабкою сейсмічністю і розміщених на них техногенно- і екологічно-небезпечних об'єктів є достатньо високим.

Сейсмічна безпека території України визначається за допомогою комплексу геофізичних методів в рамках робіт із загального сейсмічного районування (ЗСР) території всієї країни, детального сейсмічного районування (ДСР) окремих її районів та сейсмічного мікрорайонування (СМР) кожного окремого майданчика. Зазначені типи районування відрізняються за об'єктами, завданнями та масштабами дослідження.

Невід'ємною частиною ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] є карти загального сейсмічного районування (ЗСР), на яких відображено результати зонування сейсмічної безпеки в термінах сейсмічної інтенсивності (бальності), яка із імовірністю 90 % (карта А), 95 % (карта В), та 99 % (карта С) не буде перевищена за найближчі 50 років. Приведені на картах ЗСР дані одержуються шляхом статистичного аналізу, прогнозування наявних макросейсмічних, інструментальних сейсмологічних, геолого-геофізичних, тектонічних та геодинамічних матеріалів, перерахованих у терміни сейсмологічної безпеки.

Терміни «карти загального сейсмічного районування» та «карти сейсмічного зонування» ідентичні за своїм змістом. Перший термін знайшов застосування в нормах СРСР і більшості країн СНД, другий (Seismic Zoning Maps) – в нормах країн далекого зарубіжжя.

ЗСР слугує для цілей планування розвитку народного господарства в масштабах країни і великих регіонів. Виділення сейсмонебезпечних регіонів базується на результатах сумісного аналізу інструментальних і макросейсмічних даних про землетруси минулих років (інтенсивність коливань

на поверхні Землі, просторовий розподіл вогнищ землетрусів, повторюваність і т.д.) і геологічних особливостей району (історія геологічного розвитку, інтенсивність і контрастність новіших та сучасних тектонічних рухів, вік і характер тектонічних порушень, їх активність і т.д.)

При ДСР, як і при ЗСР, вивчаються джерела сейсмічної небезпеки – зони виникнення вогнищ землетрусів, а також умови генерації і поширення сейсмічних коливань. Задача ДСР – виявлення і оцінка характеристик сейсмогенеруючих зон, сейсмічні події в яких представляють небезпеку для конкретних об'єктів. Під об'єктом розуміється, як окрема будівля, так і комплекс будівель, населений пункт або район інтенсивного освоєння [Алешин, 2010]. Ступінь детальності досліджень при ДСР визначається єдиним критерієм – безпекою об'єкта. Враховується небезпека, пов'язана з землетрусами малих магнітуд, які не розглядаються при ЗСР. При малих магнітудах площа ураження невелика, але значні збитки можуть бути пов'язані з особливою цінністю об'єкта або з тим, що його руйнування можуть представляти велику небезпеку для населення та навколишнього середовища.

Як і в усьому світі, в Україні відбувається процес урбанізації. Населення, культурні і матеріальні цінності концентруються в великих містах, які являються також центрами управління господарсько-економічної діяльності регіонів. Хоча перед ДСР стоять ті ж задачі, що і перед ЗСР, пониження рангу картуючих структур, рівня представницьких магнітуд землетрусів, підвищення точності визначення параметрів землетрусів потребують спеціальних, більш затратних досліджень на обмеженій території. Особливості вогнищевих зон, які впливають на формування сейсмічних коливань, вивчаються при ДСР більш детально.

Дослідження сейсмічних ефектів (ступінь і характер пошкоджень будівель та споруд) землетрусів минулого століття дозволили достатньо надійно встановити [Алешин, 2010; Yoshida, 2015], що інтенсивність сейсмічних коливань, і відповідно, руйнувань на слабо консолідованих ґрунтах є значно більшою, ніж на сусідніх ділянках, складених щільними скельними

породами. Залежно від типу, складу і потужності ґрунтових пластів, коливання на одних частотних інтервалах можуть вибірково підсилюватися, а на інших - не змінюватися, або практично повністю поглинатися. Оцінка сейсмічної реакції ґрунту на динамічні навантаження при землетрусах входить в коло задач сейсмічного мікрорайонування (СМР) [Аптикаев, Нерсесов, 1980; Рекомендации по сейсмическому ..., 1985; Кендзера та ін., 1989; Гусев, Шумилина, 1995; Алешин, 2013; Алешин, 2015; Алешин, 2017].

При практичному визначенні 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).

В результаті робіт з ДСР уточнюються впливи, які можуть виникнути на будівельному (експлуатаційному) майданчику від землетрусів, пов'язаних із близькими потенційно сейсмоактивними зонами, вплив яких не вдалося врахувати при розробці карт ЗСР.

Роботи з СМР дозволяють 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 відображаються відносно однорідні ділянки, для яких встановлюються уточнені значення сейсмічної інтенсивності (бальності) і будуються модельні прогнозні значення змінної в часі поведінки повного вектора сейсмічних коливань поверхні ґрунту в термінах прискорення (акселерограми), швидкості (велисограми) та зміщення (сейсмограми). При цьому враховується що коливання ґрунту на майданчику будуть суттєво відрізнятися при землетрусах з вогнищами в близьких та віддалених сейсмоактивних зонах. Для майданчиків на території України такою віддаленою сейсмоактивною зоною є підкорова сейсмоактивна зона Вранча, землетруси з якої потрясають практично усю

територію України з інтенсивністю $9 \div 4$ бали Макросейсмічної шкали MSK-64 [Будівництво,...2014].

Карти СМР зазвичай мають масштаб не менший від 1:25000. Перехід від карт ЗСРР і ДСР до карт СМР здійснюється на основі умови, що картування сейсмічної небезпеки на картах ЗСР і ДСР відноситься до «середніх ґрунтів». На будівельному майданчику при проведенні СМР виділяються ділянки з підвищеним і пониженим рівнем відносно середнього рівня інтенсивності. Окрім терміну «середній ґрунт» в СМР вживається також термін «еталонний ґрунт». Під ним розуміють скельний або напівскельний ґрунт, спектр коливань на якому найбільш широкий. Різниця спектрів коливань на рихлому та еталонному (скельному) ґрунтах є частотною характеристикою рихлого (м'якого) ґрунту.

Сила землетрусу, згідно розглянутих вище методів сейсмічного районування, на будівельному чи експлуатаційному майданчику оцінюється інтенсивністю. Інтенсивність землетрусу – інтегральна міра коливань ґрунту, яка визначається параметрами руху ґрунту, рівнем руйнування будівель та споруд, характером зміни земної поверхні та ін. Інтенсивність вимірюється в балах макросейсмічної шкали [Національний стандарт...,2010]. Одиниця виміру інтенсивності бал є досить ефективною при економічних розрахунках, але малоінформативною з інженерно-будівельної точки зору [Оценка..., 1988]. Методи розрахунку будівель та споруд на сейсмостійкість потребують фізичних параметрів коливань ґрунту. При цьому більшість в розрахунках не використовується.

1.4. Методи розрахунків споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу

Розрахунки споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу згідно [Будівництво,...2014] слід виконувати із використанням:

- спектрального методу;

- прямого динамічного методу із застосуванням інструментальних записів прискорень ґрунту при землетрусах або набору синтезованих акселерограм;

- нелінійного статичного розрахунку, що застосовується за необхідності врахування нелінійної реакції конструкцій та/або в якості альтернативи до нелінійного динамічного розрахунку.

Методи, що застосовуються при розрахунках на сейсмічні впливи, наведені в таблиці 1.1. Розрахунки за спектральним методом слід виконувати для всіх будівель і споруд. У разі розбіжності результатів розрахунку за спектральним методом і прямим динамічним методом слід приймати більш не вигідні значення навантажень (при цьому розрахункові сейсмічні навантаження приймаються не нижче навантажень, визначених за спектральним методом відповідно до розділу 6.3 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014].

Таблиця 1.1

Методи, що застосовуються при розрахунках на сейсмічні впливи

Ч.ч.	Метод розрахунку	Типи будівель (споруд)
1	а) Спектральний метод із застосуванням спрощених розрахункових моделей споруд з урахуванням поступальних коливань, згідно 1.4.3.1 – 1.4.3.10;	Будівлі та споруди простої геометричної форми із симетричним і регулярним розміщенням мас і жорсткостей, із найменшим розміром у плані не більше 30 м;
	б) Спектральний метод із урахуванням, окрім поступальних, крутильних сейсмічних впливів (сейсмічного моменту, нерівномірного поля	Будівлі та споруди несиметричні в плані або по висоті; Будівлі каркасні, заввишки понад 50 м у районах сейсмічністю 6 балів

	коливань ґрунту), відповідно до 1.4.3.11, 1.4.3.12.	
2	Прямий динамічний метод, згідно 6.4 (при цьому розрахункові сейсмічні навантаження та моменти приймаються не нижче навантажень, визначених за спектральним методом згідно з 1 б) цієї таблиці)	Будівлі та споруди із принципово новими конструктивними рішеннями, які не пройшли експериментальної перевірки; Об'єкти класу наслідків СС2 і СС3 згідно з ДБН В.1.2-14; Будівлі заввишки понад 16 поверхів і споруди заввишки 50 м і вище і споруди з прольотами понад 30 м; Будівлі та споруди, що оснащені системою сейсмоізоляції та іншими системами регулювання сейсмічної реакції
3	Нелінійний статичний розрахунок	Будівлі простої геометричної форми із симетричним і регулярним розміщенням мас і жорсткостей, із найменшим розміром у плані до 30 м включно; Будівлі, що оснащені системою сейсмоізоляції та іншими системами регулювання сейсмічної реакції; Будівлі, що експлуатуються в сейсмічних районах, при визначенні їх сейсмостійкості, проектуванні їх реконструкції та підсилення.

В залежності від класу відповідальності досліджуваного об'єкта, використовується карта А, В або С з додатку Б ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] і метод розрахунку з вище наведених.

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 дозволяє порівняти розраховані прогнозні сейсмічні напруження з допустимими проектними напруженнями в ґрунтовій основі та відповідальних конструкціях будинків і споруд.

Для застосування прямого динамічного методу проводяться роботи з сейсмічного мікрорайонування і генеруються розрахункові акселерограми для ґрунтових умов конкретного будівельного майданчика. Розрахункові акселерограми враховують особливості спектральних характеристик ґрунтової товщі під будівельним майданчиком, що досліджується [Кендзера, 1996; Kendzera, Semenova, 2019; Кендзера, Семенова, 2019].

При 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. Відбувається це шляхом визначення додаткових сейсмічних навантажень при розрахункових землетрусах 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 ДБН В.1.1-12:2014 застосовується в окремих випадках (див. Табл.6.2 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014]), а розрахунки за спектральним методом виконуються для всіх проєктованих будівель та споруд в сейсмічних районах України. Таким чином, спектральний метод розрахунку на сейсмічні впливи є частіше застосовуваним, у порівнянні з прямим динамічним методом розрахунку, для територій, що відносяться згідно карт ЗСР до 6 бальної зони.

При одночасному застосуванні прямого динамічного і спектрального методів розрахунку, у разі розбіжності результатів, приймаються максимальні значення навантажень. Спектральний метод широко використовується у світі при розрахунках на сейсмічні впливи будівель та споруд в межах пружних моделей.

При використанні спектрального методу розрахунку на сейсмічні впливи згідно ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] розрахункове значення горизонтального сейсмічного навантаження S_{ki} , прикладеного до точки k і яке відповідає i -ій формі власних коливань будівлі або споруди, треба визначати за формулою

$S_{ki} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot S_{0ki}$, де k_1 – коефіцієнт, що враховує непружні деформації і локальні пошкодження елементів будівлі (споруди); k_2 – коефіцієнт, що враховує тип і призначення будівлі (споруди); k_3 – коефіцієнт, що враховує поверховість будівлі заввишки понад 5 поверхів.

S_{0ki} – горизонтальне сейсмічне навантаження за i -ю формою власних коливань споруди, що визначається у припущенні пружного деформування конструкцій за формулою:

$S_{0ki} = Q_k \cdot a_0 \cdot k_{ep} \cdot \beta_i \cdot \eta_{ki}$, де Q_k – навантаження, що відповідає масі, прийнятій у якості зосередженої у точці k ; a_0 – розрахункова амплітуда прискорення основи; k_{ep} – коефіцієнт, що враховує нелінійне деформування ґрунтів, приймається за таблицею 6.6 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] (див. Табл.1.2); β_i – спектральний коефіцієнт динамічності, що відповідає i -ій формі власних коливань будівлі або споруди. Приймається за рисунком 6.2 ДБН В.1.1-12:2014 (див. рис. 1.5) або таблицею 6.7 ДБН В.1.1-12:2014 (див. Табл.1.3) залежно від періоду i -ї форми і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями; η_{ki} – коефіцієнт, що залежить від форми власних коливань будівлі або споруди і від місця розташування навантаження.

Значення коефіцієнта k_{zp} , який враховує нелінійне деформування ґрунту при інтенсивних сейсмічних коливаннях

Категорія ґрунту	Сейсмічність майданчика будівництва в балах			
	6	7	8	9
I	1,0	1,2	1,3	1,4
II	1,0	1,0	1,0	1,0
III	1,0	0,8	0,75	0,7
IV	За даними спеціальних досліджень			

Сейсмічність майданчика будівництва в балах приймається за шкалою відповідно до ДСТУ Б В.1.1-28 [Національний стандарт..., 2010]

Значення коефіцієнта β_i

Категорія ґрунтів за сейсмічними властивостями	Ділянка графіка β_i при значенні T_i	Значення β_i або формула для розрахунку $\beta_i (T_i)$
I	При $T_i \leq 0,1c$	$1+15 T_i$
	При $0,1c < T_i \leq 0,4c$	2,5
	При $T_i > 0,4c$	$1,35/T_i^{2/3}$
II	При $T_i \leq 0,1c$	$1+15 T_i$
	При $0,1c < T_i \leq 0,6c$	2,5
	При $T_i > 0,6c$	$1,8/T_i^{2/3}$
III	При $T_i \leq 0,1c$	$1+15 T_i$
	При $0,1c < T_i \leq 1,2c$	2,5
	При $T_i > 1,2c$	$3/T_i$
IV	За результатами спеціальних досліджень	
Примітка. Значення коефіцієнтів β_i слід приймати не менше 0,8 і не більше 2,5.		

Для визначення розрахункового значення відносного прискорення ґрунту для досліджуваного майданчика (населеного пункту) залежно від сполучень розрахункової сейсмічної інтенсивності на картах А і В карт загального

сейсмічного районування ЗСР використовується Таблиця 1.4 [Будівництво,...2014]. Такий підхід є фізично некоректним, оскільки не існує прямої залежності між інтенсивністю в балах та прискоренням ґрунту [Алешин, 2013; Гусев, 2011; Кендзера, Семенова 2019; Кендзера, Семенова, 2021а; Кендзера, Семенова, 2021б].

Таблиця 1.4

Значення розрахункових відносних прискорень a_0 для даного майданчика (населеного пункту) залежно від сполучень розрахункової сейсмічної інтенсивності на картах А і В загального сейсмічного районування території України ЗСР-2004 [Будівництво,...2014]

Номер сполучення	Інтенсивність на картах, бали шкали сейсмічної інтенсивності згідно з ДСТУ Б В.1.1-28		Розрахункові значення a_0
	А	В	
1	6	6	0,05
2	6	7	0,08
3	7	7	0,10
4	7	8	0,15
5	8	8	0,20
6	8	9	0,30
7	9	9	0,40

Примітка. Зазначені в таблиці бали сейсмічної інтенсивності повинні бути визначені з урахуванням результатів сейсмічного мікрорайонування (СМР) майданчика будівництва як для повторюваності землетрусів 1 раз на 500 років, так і для повторюваності 1 раз на 1000 років.

Таким чином, a_0 , k_{zp} та β_i , які визначають розрахункове значення горизонтального сейсмічного навантаження S_{ki} на будівлі та споруди повністю залежать лише від категорії ґрунту за сейсмічними властивостями і сейсмічності майданчика будівництва в балах.

З додатку Д документа «Шкала сейсмічної інтенсивності» [Національний..., 2010] (див. рис.1.2) слідує, що при 6 балах можуть

спостерігатися максимальні прискорення від 3,5 см/с² до 500 см/с². Отже, перераховуючи бали в пікові прискорення ґрунту за Таблицею 1.4, спектральний метод розрахунку на сейсмічні впливи не забезпечує достовірного результату.

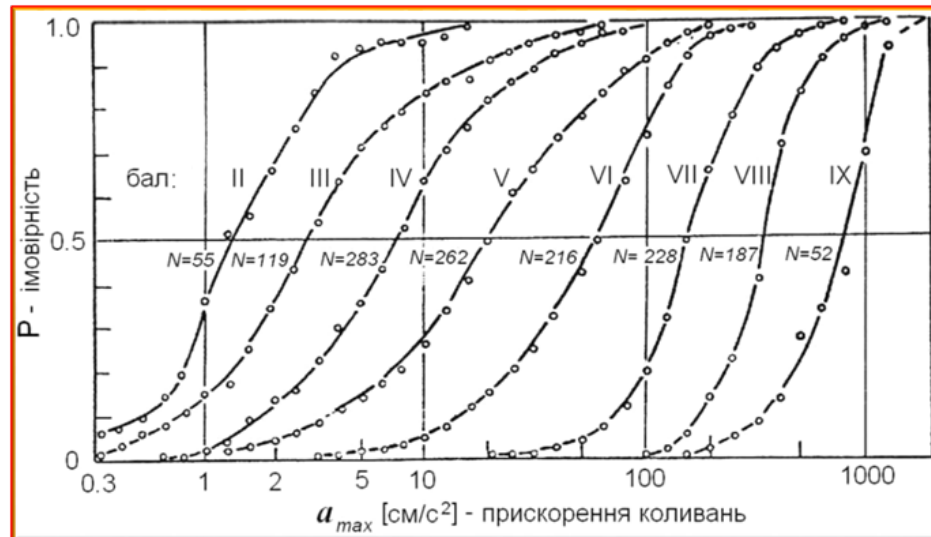


Рис. 1.2 Співвідношення (статистичне) між бальністю макросейсмічної шкали і прискоренням коливань ґрунту при землетрусах (N-кількість проаналізованих землетрусів) за Аптікаєвим Ф.Ф. [Аптікаєв, 2012]

При землетрусі в Японії 11.03.2011 р. на приблизно однаковій епіцентральної відстані (біля 200 км) різними сейсмічними станціями було зареєстровано максимальні прискорення ґрунту від 0,3 g до майже 3 g [De Luca, Chioccarelli, 2011] (Таблиця 1.5). Така суттєва розбіжність обумовлена різноманіттям ґрунтових умов і особливостями поширення в них сейсмічних хвиль, тобто резонансними та фільтруючими сейсмічними властивостями ґрунтів [Кендзера, Семенова, 2016]. Приклад розподілу сейсмічного ефекту від землетрусу в Японії 11.03.2011 р. та ряду інших землетрусів вказує, що інформацію про сейсмічну небезпеку територій слід надавати проєктувальникам і експлуатаційникам сейсмостійких споруд у фізичних одиницях коливань ґрунту, а не в балах сейсмічної інтенсивності [Інженерні вишукування..., 2019; Кендзера, Семенова, 2021]. Цього потребують сучасні методи інженерних розрахунків будівель та споруд на аварійне сполучення

навантажень з урахуванням сейсмічного впливу. Прогнозовані сейсмічні впливи вивчають і надають дані про них проєктувальникам сейсмологи.

Таблиця 1.5

Пікові параметри коливань ґрунту, зареєстровані телеметричною сейсмологічною мережею широкосмугових станцій K-net

Station Code	Dir	Level	Epicentral Distance	R _{jb} Distance	PGA	PGAr	PGV
			km	km	g	cm/s ²	cm/s
MYG004	NS	Surface	169	63	2,908	2699,9	109,75
IBR003	NS	Surface	254	33	1,687	1597,6	65,03
MYG012	NS	Surface	169	51	0,681	758,4	33,38
MYG013	NS	Surface	175	57	1,463	1517,2	85,76
MYG004	EW	Surface	169	63	1,218	1268,5	47,97
IBR003	EW	Surface	254	33	1,226	1185,9	42,91
MYG012	EW	Surface	169	51	1,906	1969,2	51,44
MYG013	EW	Surface	175	57	0,943	982,3	46,64
MYG004	UD	Surface	169	63	1,948	1879,9	38,90
IBR003	UD	Surface	254	33	1,113	1165,7	26,61
MYG012	UD	Surface	169	51	0,491	500,8	21,01
MYG013	UD	Surface	175	57	0,299	290,2	20,41

Прогнозні значення коливань ґрунту завжди були краще сейсмологічно обґрунтованими інтенсивністю сейсмічних коливань в балах, оскільки геофізичними методами точніше досліджуються сейсмічні рухи вільної поверхні ґрунту [Аптикаев, Шебалин, 1988; Гусев, Шумилина, 1995]. Проєктувальники сейсмостійких споруд при дослідженні поведінки систем «ґрунт – будівля» розраховують сейсмостійкість проєктованого об'єкту та змінюють моделі, визначаючи найбільш економічно обґрунтований серед сейсмостійких проєктів. Сейсмологи надають вихідні дані для моделювання сейсмічної реакції будинків і споруд під час проєктних землетрусів.

Все вище наведене вказує на необхідність розвитку методології розробки карт сейсмічного зонування території України в фізичних одиницях коливань ґрунту, що продиктовано потребами сучасних методів сейсмостійкого проєктування і будівництва.

1.5. Аналіз сучасних методів врахування впливу місцевих ґрунтових умов на сейсмічний ефект в будівельних нормах України

1.5.1. Категорії ґрунтів за сейсмічними властивостями

Сукупність фізико-механічних параметрів і інженерно-геологічних показників ґрунтів, які впливають на сейсмічний ефект землетрусів називається сейсмічними властивостями ґрунтів. Кожний ґрунт має свої, тільки йому притаманні сейсмічні властивості. Сейсмічні властивості ґрунту, і відповідно закони трансформації хвиль в ньому, залежать від ряду факторів. До таких факторів можна віднести як фізичні властивості ґрунту, так і механічні. Характеристики фізичних властивостей виражають фізичний стан ґрунту (густину, вологість та ін.) і дозволяють їх класифікувати по типу, виду, різновидності. Під механічними властивостями ґрунтів слід розуміти їхню поведінку під дією зовнішнього навантаження або при зміні їх фізичного стану (наприклад, висихання) [Soil Mechanics..., 2002; Механіка ґрунтов..., 2015]. Механічні властивості ґрунтів залежать від мінерального і гранулометричного складу, фізичного стану (щільності, вологості, температури) і структурних особливостей. Механічні властивості оцінюються переважно деформаційними характеристиками і здатністю чинити опір до деформації або руйнування. Для різних типів порід, залежність сейсмічних властивостей від вказаних характеристик є різною.

Основні параметри, якими характеризуються сейсмічні властивості ґрунтів:

- швидкості поширення поздовжніх та поперечних хвиль (V_p , V_s);
- відповідні коефіцієнти поглинання;
- сейсмічна жорсткість γ – характеризує здатність ґрунту чинити опір проходження пружної хвилі. В середовищі з більшим значенням сейсмічної жорсткості γ амплітуда хвилі при рівній енергії джерела буде більшою, ніж в середовищі з меншим значенням.

Згідно Таблиці 1.6 (Таблиця 5.1 ДБН В.1.1: 12-2014)[Будівництво,...2014] ґрунти за сейсмічними властивостями поділяються на 4 категорії.

**Категорії ґрунтів за сейсмічними властивостями згідно Табл.5.1 ДБН В.1.1:
12-2014[Будівництво,...2014]**

Категорія ґрунту за сейсмічними властивостями	Ґрунти	Нормативна сейсмічність майданчика будівництва за сейсмічності району, бали				Швидкості поширення сейсмічних хвиль в ґрунті, V_s , м/с
		6	7	8	9	
I	Скельні ґрунти усіх видів невивітрілі та слабовивітрілі; великоуламкові ґрунти щільні, маловологі з магматичних порід, які вміщують до 30 % піщано-глинистого заповнювача	5	6	7	8	$V_s > 800$
II	Скельні ґрунти вивітрілі і сильновивітрілі; великоуламкові ґрунти, за винятком віднесених до I категорії; піски гравіюваті, великі та середньої крупності, щільні та середньої щільності, мало вологі та вологі; піски дрібні і пилуваті, щільні і середньої щільності мало вологі; пилувато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L \leq 0,5$ при коефіцієнті пористості $e < 0,9$ – для глин і суглинків, та $e < 0,7$ – для супісків	6	7	8	9	$500 < V_s < 800$
III	Піски рихлі незалежно від ступеня вологості та крупності; піски гравіюваті, крупні та середньої крупності, щільні та середньої щільності; піски дрібні та пилуваті, щільні та середньої щільності, вологі та водонасичені; пилувато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L > 0,5$; пилувато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L \leq 0,5$ при коефіцієнті пористості $e \geq 0,9$ – для глин і суглинків та $e \geq 0,7$ – для супісків	7	8	9	10	$200 < V_s < 500$
IV	Піски рихлі водонасичені, схильні до	За				$V_s < 200$

	розрідження; насипні та гумусні ґрунти; пливуні, біогенні ґрунти та намули	результатами спеціальних досліджень	
<p>Примітка 1. У випадку неоднорідного складу ґрунти майданчика будівництва відносяться до найбільш несприятливої категорії ґрунту за сейсмічними властивостями, якщо у межах десятиметрового шару ґрунту, починаючи відлік від планувальної відмітки у випадку виймання і чорної відмітки – у випадку насипання, сумарна потужність шарів, що відносяться до цієї категорії, перевищує 5 м.</p> <p>Примітка 2. У разі прогнозування підйому рівня ґрунтових вод та (або) обводнення ґрунтів у процесі експлуатації будівлі категорії ґрунту слід визначати в залежності від властивостей ґрунту (ступеня вологості, показника текучості) у замоченому стані (за винятком локального аварійного замочування, вплив якого при уточненні сейсмічності майданчика не враховується).</p> <p>Примітка 3. Пилувато-глинисті ґрунти (зокрема просідаючі твердої консистенції або в твердому стані) при коефіцієнті пористості поблизу значень $e = 0,9$ - для глин і суглинків та $e = 0,7$ – для супісків можуть бути віднесені до II категорії за сейсмічними властивостями, якщо нормативне значення їх модуля деформації $E \geq 15$ МПа, а при експлуатації споруд будуть забезпечені умови непідтоплення ґрунтів основи. За відсутності даних щодо консистенції або вологості глинисті та пісчані ґрунти при положенні рівня ґрунтових вод вище 5 м відносяться до III категорії.</p> <p>Примітка 4. Переважаючий період власних коливань ґрунтової товщі визначається за результатом мікросейсморайонування. В разі відсутності даних сейсмічного мікрорайонування допускається визначати період власних коливань ґрунтової товщі за Додатком В.</p> <p>Примітка 5. Сейсмічність майданчика визначається в цілих балах. Для ґрунтових умов, при яких можливе визначення категорії ґрунту за сейсмічними властивостями як проміжне, визначення бальності за інтерполяцією не допускається, а остаточне рішення приймається вишукувальною організацією за результатами додаткових визначень і/або комплексним аналізом.</p> <p>Примітка 6. Насипні ущільнені ґрунти при їх відсипанні і масиви укріплених ґрунтів залежно від їх зернового складу, показників e, I_L, S_r і величини модуля деформацій можуть бути віднесені вишукувальною організацією до II або III категорії, за відповідними вимогами, які сформовані в описовій частині таблиці.</p>			

Існує декілька міжнародних класифікаторів ґрунтів з більш дробовим поділом за сейсмічними властивостями. Найвідоміші з них засновані на

масштабних даних інструментальних та макросейсмічних спостережень. Як приклад можна привести Єврокод 8, або прийняту в Греції класифікацію ЄАК-2000. При всіх розбіжностях, ці класифікації представляють по суті модифікації Рекомендацій NEHRP-1997 [The NEHRP..., 1998], прийнятих в США. Згідно з Рекомендаціями, розробленими Комісією по сейсмічній небезпеці Національного інституту будівельних наук, всі ґрунти поділяються за сейсмічними властивостями на 6 класів, позначених індексами від А до F. З урахуванням додаткових проміжних класів в міжнародній практиці широко застосовуються більш дробові, розділені на 8 і більше класів класифікації ґрунтів. Один з варіантів представлений у Таблиці 1.7.

Таблиця 1.7

**Категорії ґрунтів за класифікацією міжнародного будівельного коду
(International Building Code IBC)**

Категорія ґрунту	Опис ґрунту	Швидкість поперечних хвиль V_s у верхніх 30 м ґрунту, м/с	Опір стандартному пенетрометру N , ударів/фут	Зсувна міцність недренованого ґрунту, кПа
A	Міцний скельний ґрунт	>1500 I к	—	—
B	Скельний ґрунт	760-1500 I к	—	—
C	Дуже міцний дисперсний або тріщинуватий скельний ґрунт	360 - 760 II к	>50	>100
D	Міцний дисперсний ґрунт	180-360 II к	15-50	50-100
E	Рихлий дисперсний ґрунт	<180 III к	<15	<50
F	Особливий ґрунт, потребуючий спеціального дослідження	—	—	—

Основним параметром, за яким визначається категорія ґрунту за сейсмічними властивостями, в даному випадку є середня швидкість поширення

пружних S-хвиль у верхній 30-метровій осадовій товщі. У випадках, коли дані про швидкості поширення S-хвиль відсутні, використовуються дані інженерних випробувань властивостей ґрунтів (пенетраційні SPT випробування і визначення міцності на зсув). Відмітимо, що в таблиці повністю ігноруються вологісні характеристики ґрунтів (якщо не брати до уваги клас F з особливими властивостями). Найбільш поширені класи ґрунтів (C, D і E) характеризуються певними конкретними показниками – швидкостями поперечних хвиль, параметрами стандартних (SPT) випробувань і/або зсувною міцністю недренованого ґрунту. В цілому можна відзначити, що ґрунти класу C, D по класифікації ІВС приблизно відповідають ґрунтам II категорії, а ґрунти класу E – ґрунтам III категорії за таблицею 5.1 ДБН В.1.1: 12-2014 [Будівництво,...2014].

Для категорії ґрунтів F, найменш стійких при сейсмічних впливах, будь-які кількісні показники в Таблиці 1.7 відсутні. Для визначення реакції цих ґрунтів на сейсмічні впливи рекомендується проведення спеціальних досліджень. До класу F відносяться ґрунтові розрізи з особливими властивостями:

- ґрунти, схильні до раптового руйнування при сейсмічних навантаженнях, такі ґрунти що здатні розріджуватись, високочутливі, глини або слабо зцементовані осадові ґрунти, які швидко реагують на навантаження;
- шари торфу і/або глини з високим вмістом органічного матеріалу загальною потужністю понад 3 м; шари глин з індексом пластичності більшим 75 загальною потужністю понад 8 м;
- шари м'яких або середньої жорсткості глин загальною потужністю понад 36 м.

Таблиця 1.6 дозволяє оцінити (в рамках методу інженерно-геологічних аналогій) очікувану сейсмічну інтенсивність майданчика при відомій з карт загального сейсмічного районування ЗСР-2004 вихідній сейсмічності району та знаючи властивості ґрунту. Приріст інтенсивності для ґрунтів кожної сусідньої категорії відрізняється на 1 бал, і це співвідношення не залежить від вихідної

сейсмічності, тобто ґрунтові відмінності однаково впливають на сумарний сейсмічний ефект, незалежно від вихідного сейсмічного балу.

Вимоги до інженера-геолога при виконанні сейсмічного мікрорайонування полягає у виконанні аналізу та узагальненні сукупності даних і віднесення ґрунтів ділянки до тієї чи іншої категорії за сейсмічними властивостями з урахуванням як інженерно-геологічних даних, так і геофізичних показників, побудові на цій основі попередньої розрахункової моделі ґрунтової товщі (карт і розрізів) для подальшого її уточнення сейсмологічними методами.

В результаті численних досліджень будівельні норми європейських країн, США та Японії, істотно вдосконалилися стосовно врахування поведінки ґрунтів при землетрусах. Кількість категорій ґрунту збільшилася з 3-4-х до 5-ти основних і 2-х додаткових, найгірших в сейсмічному плані і що потребують спеціальних досліджень. Категорії ґрунту виділялися на основі інженерно-сейсмологічних даних про склад і параметри ґрунтових товщ, зібраних на територіях цих країн. У європейських нормах з'явилася категорія ґрунту з вираженими резонансними властивостями (E) [Eurocode-8, 2004], а в нормах США її немає, оскільки на території США такі ґрунти не поширені [Павленко, 2020]. Інші відмінності норм США і країн Євросоюзу також пов'язані з регіональними особливостями цих територій.

1.5.2. Застосування спектрів реакції

Для інженерних розрахунків в практиці сейсмічного мікрорайонування вже давно прийнято використовувати спектри реакції, які представляють собою реакцію системи маятників з одним ступенем свободи з одним і тим же згасанням, але різним періодом власних коливань. Така система моделює реакцію реально існуючих споруд. Інерційна сила, що діє під час сейсмічного впливу на споруду, дорівнює добутку маси споруди на величину ординати графіка спектра реакції. Правильне задання параметрів сейсмічного впливу, з одного боку, запорука сейсмічної безпеки, а з іншого - забезпечує розумне, без

зайвих подробиць, задання сейсмічних навантажень, що дозволяє спроектувати економічно вигідно сейсмостійку споруду без втрати надійності.

Ще в 1997 році в США була опублікована серія карт, на яких замість звичного значення пікових максимальних прискорень ґрунту відображалися спектральні характеристики сейсмічних впливів, а саме спектри реакції окремо для високочастотних і низькочастотних сейсмічних коливань, відповідно для періодів 0,2 с і 1,0 с. Такий поділ, незважаючи на всю умовність визначення точного положення границі, що їх розділяє (0,2 або 0,3 с), відповідає зонам сталості прискорень (високочастотний діапазон) швидкостей зміщень (низькочастотний діапазон) [Алешин, 2018]. Таким чином, для кожного населеного пункту території США були отримані карти наступних параметрів спектрів реакції: S_S – спектра прискорення для періоду 0,2 с, S_I – спектральної швидкості на періоді 1 с і, та S_L – спектра на наднизьких періодах T_L , що має значення для забезпечення сейсмічної безпеки висотних будівель. За цими трьома параметрами можна побудувати повний графік спектра реакції, процедуру побудови розглянемо далі на прикладі.

Перш за все, на осі абсцис відмітимо кардинальні точки зміни спектральної щільності. Це точки 0 , T_0 , T_S і T_L . Нуль це точка нульового періоду, а значення T_L знімається з відповідної карти. Значення T_S визначається виразом $T_S = S_I / S_S$. Звернемо увагу на відмінність в розмірностях S_I і S_S : перша величина S_I характеризує швидкість зміщень з розмірністю см/с, в той час як друга - S_S відноситься до прискорень з розмірністю см/с². Відношення обох величин - розмірна величина T_S з розмірністю часу. Значення T_0 визначається співвідношенням $T_0 = 0,2 T_S$. Визначимо тепер ординати графіка. Спектральна щільність S_S визначає полиця значень між T_0 і T_S . Ордината на нульовому періоді S_0 визначається співвідношенням $S_0 = 0,4 S_S$. Графік зростання прискорень між нульовим періодом і періодом T_0 визначається виразом

$$S = 0,6 \frac{S_s}{T_0} T + 0,4 S_s$$

Далі на графіку відзначається полиця на рівні S_s в діапазоні періодів від T_0 до T_s . Правий (низькочастотний) край полиці відповідає значенням $T = S_1/S_s$. Найбільше відношення величин S_1 , S_s , знятих з відповідних карт, не перевищує 0,6. Це означає, що ширина полиці (для умов території США) не перевищує 0,5 с. Графік спектральної щільності на інтервалі від T_s до T_L дається виразом $S_a = \frac{S_1}{T}$. У цьому діапазоні періодів, щоб отримати постійне прискорення, необхідно спектральну швидкість ділити на період T . При періодах великих T_L в області з постійним зміщенням, щоб компенсувати падіння прискорень, необхідно використовувати вираз $S_a = \frac{S_1}{T^2} T_L$, тобто ділити спектральні зміщення на T^2 . На рис. 1.3 наведено спектр реакції у всьому діапазоні частот – від найвищих, відповідно найкоротших періодів, до найнижчих частот, і відповідно наддовгих періодів.

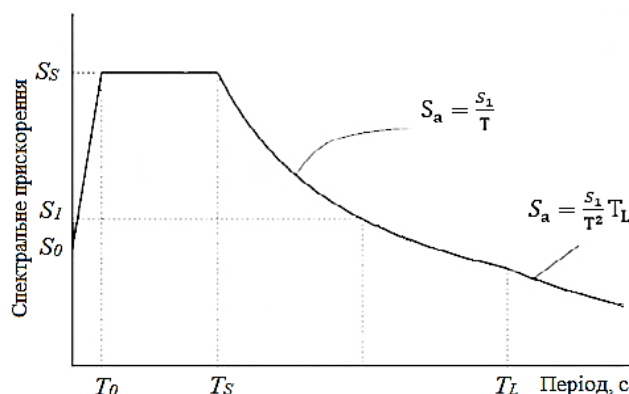


Рис. 1.3 Спектр реакції одиничних осциляторів без урахування ґрунтових умов

Рівень прискорень на високих частотах (нульових періодах) визначається значенням S_0 . В державних будівельних нормах це значення пов'язане з сейсмічною інтенсивністю: 7 балів – 0,1 g; 8 балів – 0,2 g; 9 балів – 0,4 g відповідно до розділу 6 (Таблиця 1.4) ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво, ... 2014].

Прискорення відповідні T_0 в 2,5 рази більше T_s . Положення точок T_0 і T_s в українських нормах на відміну від американських фіксоване. Незважаючи на зазначені відмінності, все ж не можна не визнати, що вітчизняні та

американські норми (а слідом за ними норми багатьох зарубіжних країн – Китай, Канада, Європейські країни та ін.) в основному узгоджуються: графіки спектрів реакції включають ділянки сталості прискорень та швидкостей.

На графіку, представленою на рис. 1.3 не враховано вплив місцевих ґрунтових умов. Для врахування впливу властивостей досліджуваної ґрунтової товщі на трансформацію сейсмічних коливань в отримані значення спектральної щільності прискорень вносяться відповідні ґрунтові коефіцієнти, представлені в таблицях 1.8 і 1.9.

Таблиця 1.8

Коефіцієнти ґрунтових умов для короткоперіодної частини спектра F_a

Категорія ґрунту	Вихідне спектральне прискорення				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1$	$S_s \geq 1,25$
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
D	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
E	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Таблиця 1.9

Коефіцієнти ґрунтових умов для довгоперіодної частини спектра F_v

Категорія ґрунту	Вихідне спектральне прискорення				
	$S_l \leq 0,1$	$S_l = 0,2$	$S_l = 0,3$	$S_l = 0,4$	$S_l = 0,5$
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
D	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
E	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4

З урахуванням цих поправок можна визначити спектри реакції одиничних осциляторів, які враховують особливості як регіональних так і місцевих сейсмічних впливів.

Подібно до того, як раніше був побудований спектр реакції без урахування ґрунтових умов, можна побудувати сімейство графіків для різних категорій ґрунту. Для цього спектральну щільність низькочастотного діапазону S_l , і високочастотну складову спектра реакції S_s треба помножити на відповідні коефіцієнти з таблиць 1.8 і 1.9. Тоді для величини T^*s отримаємо вираз $T^*s = (S_l \cdot F_v / S_s \cdot F_a)$. Вираз для T_0 залишиться тим самим: $T_0 = 0,2T^*s$. Таким чином, визначаються кардинальні точки на осі абсцис.

Ординати кардинальних точок повністю залежать від значення $S_s \cdot Fa$. Це значення в нормах США визначає величину максимального прискорення. Поряд з цією величиною в нормах США використовується також величина проектного прискорення (design spectral response), що становить $2/3$ від максимального. Ординати полиці на графіку визначається виразом $2/3 \cdot S_s \cdot Fa$, де Fa визначається в залежності від категорії ґрунту. Точки на осі ординат при $T = 0$ для різних категорій ґрунтів визначаються виразом $S_0 = 0,4 \cdot (2/3 \cdot S_s \cdot Fa)$. На періодах більших T_s спектральні прискорення зменшуються за законом $1/T$. Графіки прискорень спектрів реакцій S_0 різних категорій ґрунту в абсолютних одиницях (як за періодами, так і по спектральному прискоренню) наведені на рис. 1.4.

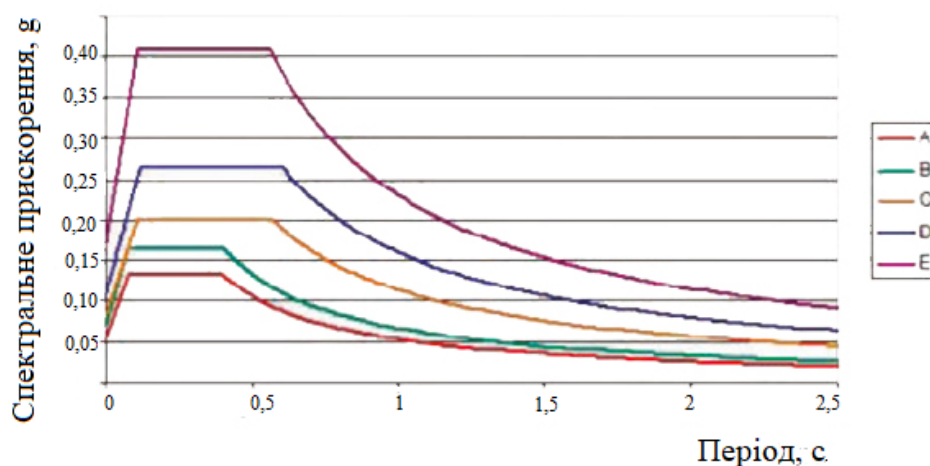


Рис. 1.4 Спектри реакції для різних категорій ґрунту за сейсмічними властивостями

Таким чином, слідує що основний внесок в параметри розрахункових сейсмічних впливів вносять короткоперіодні коефіцієнти, що впливають на рівень спектрального прискорення спектра реакції [Borcherdt, 2004].

Довгоперіодні коефіцієнти визначають положення правого кінця полиці. З рис. 1.4 також слідує, що ніякі зміни властивостей ґрунтової товщі не в змозі збільшити ширину полиці більше 0,6 с.

Далі розглянемо, як в будівельних нормах України враховується вплив властивостей ґрунту на форму спектрів реакції.

Це вплив наведено в розділі 6.2 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014], представлений на рис.1.5, де наведено графік коефіцієнта динамічності (або спектра реакції), нормованого на величину прискорення a в залежності від розрахункової сейсмічної інтенсивності I .

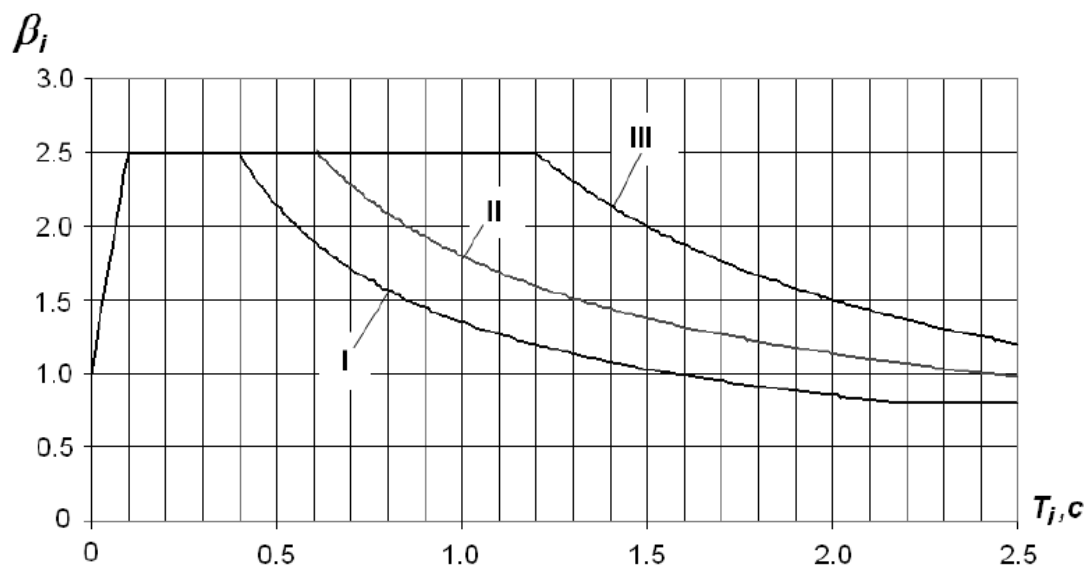


Рис.1.5 Залежності спектрального коефіцієнта динамічності β_i від категорії (I-III) ґрунту за сейсмічними властивостями і періоду i -ої форми власних коливань будівлі T_i

З графіка представленого на рис.1.5 видно, що для ґрунтів трьох категорій, величина полиці з сталим прискоренням помітно перевищує межу (0,5 с), визначену з американських норм.

Питання визначення ґрунтових коефіцієнтів наведених в таблицях 1.8 – 1.9 детально розглядається в роботі [Power et al., 2004]. Представлено

результати, отримані в основному з емпіричних даних обстеження потужних землетрусів Заходу США, а також результати комп'ютерного моделювання [Silva et al., 2000]. Значення ґрунтових коефіцієнтів, визначені різними авторами, розкидані в досить широких межах, що відображає як об'єктивний фактор - відмінність параметрів землетрусів і ґрунтів, так і є наслідком суб'єктивного фактору, який проявляється у відмінності методів обробки даних [Алешин, 2018]. Таким чином впливає, що більш обґрунтованим буде використання результатів комп'ютерного моделювання. Результати комп'ютерного моделювання в роботі [Silva et al., 2000] представлені у вигляді моделювання двох різних природних умов: моделі EPRI і моделі Peninsular Range. Щодо ґрунтових умов обох випадків наведена інформація лише про те, що майданчик EPRI розташований в околиці затоки Сан-Франциско, а майданчик Peninsular Range знаходиться в епіцентральної зоні землетрусу Нортридж. Для цих двох майданчиків, досліджених за однаковою методикою, в більшості випадків мають місце порівняно невеликі відмінності в величинах ґрунтових коефіцієнтів, які цілком можуть бути пояснені локальними відмінностями властивостей ґрунтів. Проте, і в цьому випадку, має місце факт досить значної розбіжності в значеннях ґрунтових коефіцієнтів F_a для одного і того ж ґрунтового класу D , що є додатковим аргументом щодо недостатності характеристики ґрунту за допомогою ґрунтових категорій.

Розглянуті результати досліджень, представлені в роботі [Silva et al., 2000] обумовлюють необхідність пошуку більш надійного обґрунтування прийняття величин ґрунтових коефіцієнтів. Такі ж висновки описані в роботі [Алешин, 2018]. Також в роботі [Алешин, 2018] відмічається, що як сейсмічні впливи, так і властивості ґрунту визначені в табличній формі, тобто дискретно, і перехід з однієї категорії в іншу супроводжується стрибком. І якщо стосовно сейсмічних впливів безперервність підтверджується картою, на якій параметри S_s і S_v наведені з будь-яким ступенем детальності (іншими словами, безперервно), то щодо властивостей ґрунтів переривання властивостей закріплена в формі ґрунтових категорій. В роботі [Алешин, 2018]

підкреслюється, що дискретна форма подання з використанням поняття ґрунтових категорій суперечить природі властивостей ґрунтів, безперервних по своїй суті. Використання постійних ґрунтових поправок, які відповідають певній категорії ґрунту, обумовлює стрибкоподібні зміни на границях категорій і відповідні помилки.

1.5.3. Фізичні параметри коливань ґрунту в методах розрахунку на сейсмостійкість споруд

Згідно з Додатку Б ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] карт загального сейсмічного районування території України розрахункова інтенсивність прояву землетрусів оцінюється в балах з періодами повторюваності один раз на 500 років (карта ЗСР-2004-А), 1000 років (карта ЗСР-2004-В) і 5000 років (карта ЗСР-2004-З) для середніх ґрунтових умов і ймовірності перевищення розрахункової інтенсивності протягом 50 років 10 %, 5 % і 1 %, відповідно. При цьому в інженерних розрахунках сейсмостійкості конструкцій приймаються фізичні параметри коливань ґрунту під час землетрусу. При розрахунках підземних споруд застосовуються пікові значення швидкостей і переміщень частинок ґрунту при землетрусах, а для наземних - пікові величини прискорень, швидкостей, переміщень частинок ґрунту і тривалість землетрусів. Крім того, використовуються акселерограми коливань ґрунту, сумісні з розрахунковими спектрами реакцій [Гусев, 2002; Гусев, 2003; Курбацкий, 2016]. В період 1960-2000 рр. більшість країн перейшла до сейсмічного районування (зонування) в термінах амплітудних параметрів коливань [Гусев, 2011]: в пікових прискореннях ґрунту (Європа, Японія, Китай) або в рівнях спектра реакції (США, Канада), оскільки використання проектувальниками саме цих параметрів для забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд є коректнішим у порівнянні з використанням несистемних одиниць – балів сейсмічної інтенсивності. При використанні розрахункових акселерограм, розрахованих з урахуванням особливостей місцевих ґрунтових умов конкретного будівельного майданчика проблем не виникає,

використовуючи карти ЗСР лише на етапі вибору місця будівництва і попередньої оцінки потенціалу сейсмічної небезпеки майданчика відносно інших територій в межах країни. Однак використовуючи перерахунки бальності у фізичні параметри ґрунту в розрахункових методах згідно Розділу 6 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] є необґрунтованим та фізично некоректним підходом. Наприклад, в Таблиці 6.5 ДБН В.1.1-12:2014 значення розрахункових відносних прискорень для досліджуваного майданчика (населеного пункту) приймається залежно від сполучень розрахункової сейсмічної інтенсивності на картах А і В. При цьому, зазначені в таблиці бали сейсмічної інтенсивності повинні бути визначені з урахуванням результатів сейсмічного мікрорайонування (СМР) майданчика будівництва як для повторюваності землетрусів 1 раз на 500 років, так і для повторюваності 1 раз на 1000 років. Цей перехід від бальності до відносних прискорень ґрунту є фізично некоректним, оскільки не існує залежності між бальністю і параметрами коливань ґрунту, що доведено численними дослідженнями наслідків руйнівних землетрусів [Окамото, 1980; Гусев, 2011; Vozorgnia et. al., 2004; Алешин, 2013; Алешин, 2015; Алешин, 2017, Kramer, 1996].

Чинними нормативними документами рекомендується розраховувати значення коефіцієнта k_{zp} , який враховує нелінійне деформування ґрунту при інтенсивних сейсмічних коливаннях за даними Таблиці 6.6. ДБН В.1.1-12:2014 (табл. 1.8), тобто оперуючи категорією ґрунту за сейсмічними властивостями і сейсмічністю майданчика в балах. β_i – спектральний коефіцієнт динамічності, що відповідає i -й формі власних коливань будівлі або споруди – приймається залежно від періоду i -ї форми і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями.

Згідно з таблицею 5.1. ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014] основною характеристикою при градації категорій ґрунту за сейсмічними властивостями розглядається швидкість поперечних хвиль. Слід зауважити, що швидкість поперечних хвиль, хоча і є найважливішою характеристикою сейсмічних властивостей ґрунтів, але це не єдина величина, яка визначає сейсмічні властивості ґрунту. Трансформація сейсмічних коливань в ґрунтовому масиві

істотно залежить також і від густини, точніше сейсмічної жорсткості – добутку густини на швидкість поперечних хвиль, та потужності ґрунтових шарів.

В таблиці 1.10 та 1.11 приведено основні параметри експериментальних розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтових товщ, складених ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями згідно з ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014].

Таблиця 1.10

Параметри сейсмогеологічної моделі №1 ґрунтової товщі, складеної ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями

Опис порід	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
Пісок	600	1.75	10
Пісок	700	1.80	10
Пісок	800	1.85	20
Граніт	1800	2.20	-

Таблиця 1.11

Параметри сейсмогеологічної моделі №2 ґрунтової товщі, складеної ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями

Опис порід	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
Пісок	500	1.75	25
Пісок	800	1.85	40
Граніт	1800	2.20	-

З використанням еквівалентного лінійного аналізу сейсмічної реакції програмним продуктом Proshake [Proshake, 1998; Schnabel et al., 1972; Kramer, 1996] розраховано частотні характеристики цих моделей (див. рис.1.6), амплітудні спектри Фур'є (див. рис.1.7) та спектри реакції з 5% згасанням (див.

рис.1.8). Обидві моделі зондувались вхідним сейсмічним впливом з максимальною амплітудою 0,06g.

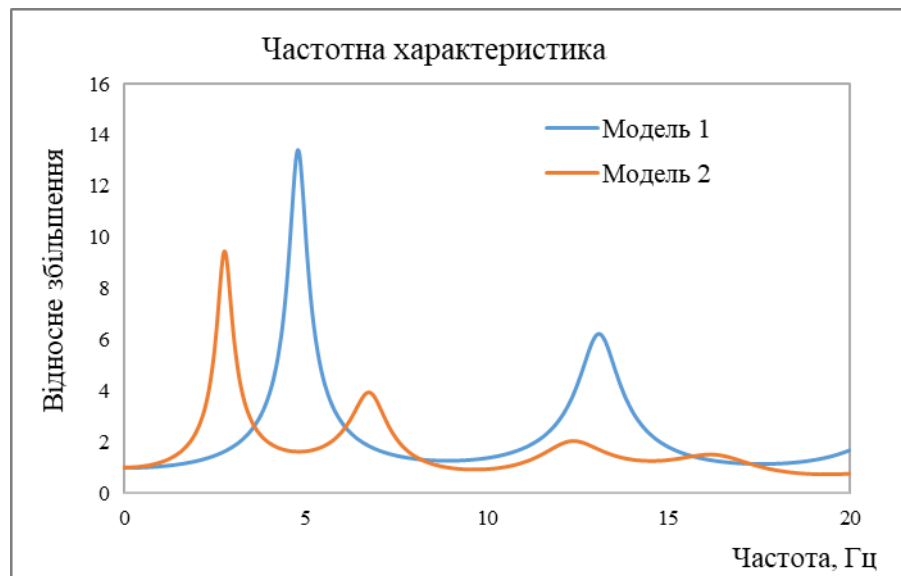


Рис. 1.6 Частотні характеристики моделей №1 і №2 ґрунтової товщі, складених ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями згідно з ДБН В.1.1-12:2014

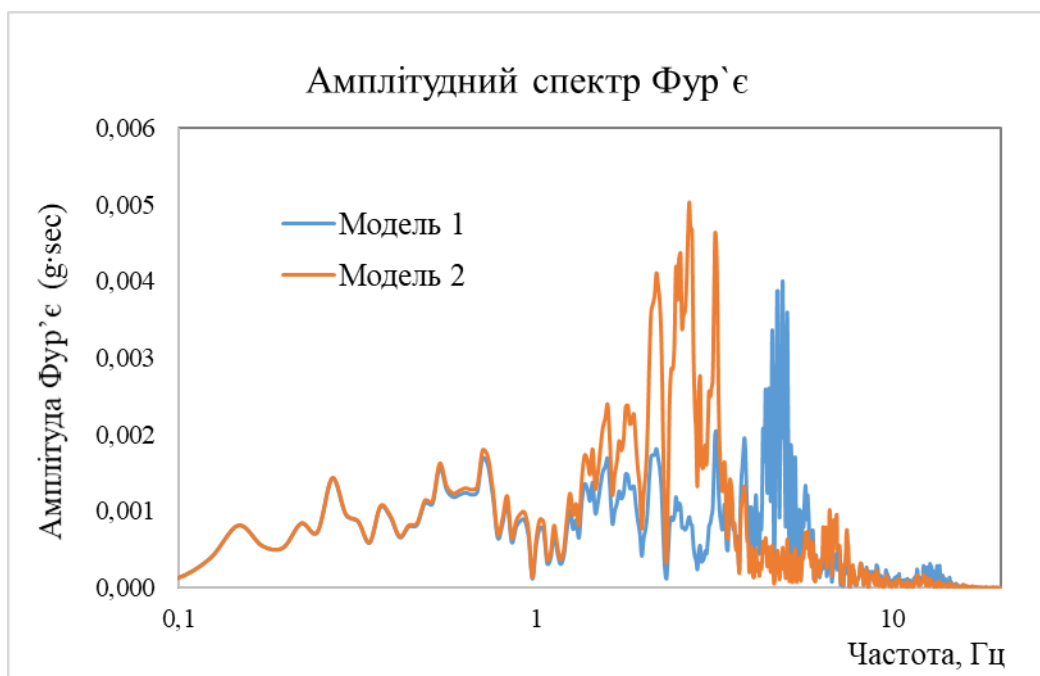


Рис. 1.7 Амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту моделей №1 і №2 ґрунтової товщі, складених ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями згідно з ДБН В.1.1-12:2014

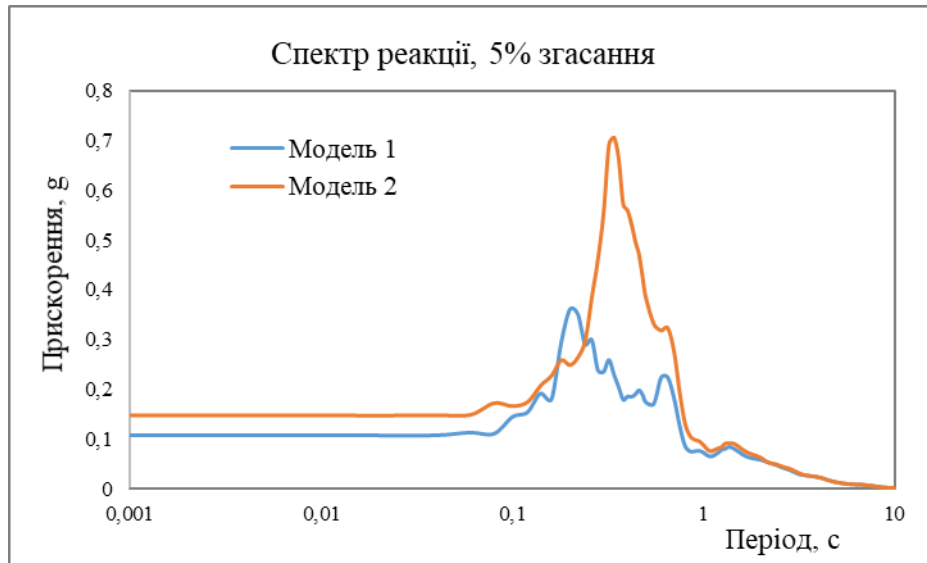


Рис.1.8 Спектри реакції моделей №1 і №2 ґрунтової товщі, складених ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями згідно з ДБН В.1.1-12:2014

З рис. 1.6-1.8 видно, що сейсмічні коливання на поверхні двох моделей ґрунтової товщі, хоча і складених ґрунтами однієї категорії за сейсмічними показниками – суттєво різняться. Частотні характеристики обох моделей демонструють, що сейсмічні коливання будуть підсилюватись на суттєво різних частотах: в моделі 1 максимум відповідає частоті 4,8 Гц з коефіцієнтом підсилення 13; в моделі 2 максимум помітно пересунувся в область нижчих частот і відповідає 2,8 Гц з коефіцієнтом підсилення 9,4. Спектр Фур'є показує, що більший амплітудний рівень коливань 0,005g буде спостерігатись у випадку моделі 2, у порівнянні з моделлю 1 – 0,004g. Це пояснюється тим, що частота максимуму частотної характеристики моделі 2 в вхідному сейсмічному коливанні містила значно більшу амплітуду ніж частота максимуму частотної характеристики моделі 1. Спектр реакції, представлений на рис.1.8 демонструє суттєво різну максимальну реакцію одиничного осцилятора для випадків двох моделей на один вхідне збурення: амплітудний рівень відрізняється в 2 рази.

Отримані результати яскраво демонструють, що сейсмічну небезпеку основи споруди чи будівлі необхідно задавати фізичними параметрами коливань ґрунту. Якщо обидві моделі згідно карт ЗСР ДБН В.1.1-12:2014

будуть характеризуватись однаковою бальністю, то відповідно, згідно таблиці 1.2 в обох випадках буде однакове розрахункове відносне прискорення. Графіки, представлені на рис.1.6-1.8 вказують на те, що такий перехід від бальності і категорій ґрунту до відносного прискорення некоректний. Для переходу від бальності до фізичних параметрів коливань ґрунту необхідні більш обґрунтовані перехідні коефіцієнти.

Використання лише категорії ґрунту в коефіцієнтах, що враховують нелінійне деформування ґрунту при інтенсивних сейсмічних коливаннях є недостатнім. Категорія ґрунту за сейсмічними властивостями не несе в собі інформацію про деформаційні характеристики ґрунту. До того ж категорія ґрунту за сейсмічними властивостями майданчика визначається згідно ДБН В.1.1-12:2014 лише для верхнього 10-метрового шару ґрунту і відповідно не враховує механізми перетворення сейсмічних коливань в ґрунтовій товщі від корінних порід до поверхні. Врахування більшої потужності осадового шару ґрунтової товщі порівняно з 10-метровою потужністю, як правило, призводить до пониження резонансних частот і збільшення / зменшення амплітуди сейсмічних коливань на поверхні за рахунок резонансних або нелінійних ефектів.

Таким чином, нові перехідні коефіцієнти від бальності та категорій ґрунтів за сейсмічними показниками повинні враховувати сейсмічні жорсткості шарів ґрунтової товщі, контрастність жорсткостей на границях між шарами та потужність осадових відкладів.

Використання сейсмічних жорсткостей в якості параметра, що характеризує властивості ґрунтового масиву, дозволяє перейти до принципово нового опису взаємозв'язку властивостей ґрунту і параметрів сейсмічних впливів з використанням безперервних (не дискретних) величин. Відносно сейсмічних впливів це вже використовується в американських і європейських будівельних нормах, в яких замість бальності сейсмічної інтенсивності, сейсмічні впливи описуються фізичними параметрами коливання ґрунту, наприклад, піковими прискореннями.

В Україні будівельні норми поновлювались в 2006 і 2014 роках, проте в розділах опису сейсмічних впливів і ґрунтових умов норми істотно не змінилися в порівнянні з попередніми нормами [РСН 60-86..., 1986; РСН 65-87..., 1988; СНиП II-7-81..., 1991;]. Можна стверджувати, що навіть, помітно спростилися при визначенні коефіцієнтів динамічності. Впровадження в практику інженерно-сейсмологічних досліджень опису сейсмічних впливів інструментальними характеристиками, наразі вимагає використання ґрунтових коефіцієнтів для врахування впливу особливостей будови і характеристик верхньої частини геологічного розрізу.

Висновки до Розділу 1

В розділі розглядається формування сучасних принципів сейсмічного захисту. Приводиться обґрунтування, що вплив місцевих ґрунтів досліджуваного експлуатаційного чи будівельного майданчика відноситься до основних факторів, які визначають кількісні параметри сейсмічних коливань поверхні ґрунтової товщі. Оцінка сейсмічної небезпеки територій та надійності будівель і споруд набуває особливої актуальності у зв'язку з розвитком будівництва, використання нових сейсмостійких конструктивних рішень для промислових, громадських та житлових будівель і споруд. З суттєвим зменшенням вільних площ для забудови, будівництво експериментальних (сейсмічно вразливих) споруд в сейсмічних регіонах країни, все частіше відбувається на ґрунтах, які раніше не розглядались в якості надійної основи. З огляду на це, актуальним стає питання надійної та обґрунтованої оцінки впливу властивостей місцевих ґрунтів на параметри сейсмічної небезпеки.

В розділі обґрунтовано та доведено некоректність перерахунків від сейсмічної інтенсивності в балах та категорії ґрунту за сейсмічними властивостями у розрахункові значення прискорення ґрунту досліджуваного майданчика (населеного пункту) при використанні спектрального методу розрахунку на сейсмічні впливи згідно ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво,...2014]. Некоректність перерахунків обумовлюється тим фактором, що не існує прямої залежності між інтенсивністю та прискоренням

грунту. Категорія ґрунту за сейсмічними властивостями не дає інформацію про деформаційні характеристики ґрунту та не враховує механізми трансформації сейсмічних коливань в ґрунтовій товщі від корінних порід до поверхні. Врахування більшої потужності осадового шару ґрунтової товщі порівняно з 10-метровою потужністю, як правило, призводить до пониження резонансних частот і збільшення або зменшення амплітуди сейсмічних коливань на поверхні за рахунок резонансних або нелінійних ефектів. Із застосуванням експериментального теоретичного моделювання сейсмічної реакції двох сейсмогеологічних моделей шаруватих ґрунтових товщ, складених в обох випадках ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями, продемонстровано помилковість такого підходу. Розраховано частотні характеристики наведених моделей, амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту та спектри реакції з 5%-ним згасанням. Отримані результати демонструють, що параметри сейсмічних коливань на поверхні двох моделей ґрунтової товщі, хоча і складених ґрунтами однієї категорії за сейсмічними властивостями, суттєво відрізняються за частотною вибірковістю підсилення сейсмічних коливань та рівнем амплітуди коливань. Амплітудні рівні отриманих спектрів реакції відрізняються в 2 рази.

Таким чином, є необхідність пошуку більш надійного обґрунтування прийняття величин ґрунтових коефіцієнтів та перехід від бальності до фізичних параметрів коливань ґрунту. Запропоновано використовувати розрахункові ґрунтові коефіцієнти отримані з використанням чисельного моделювання сейсмічної реакції, які враховують інформацію про сейсмічні жорсткості шаруватої ґрунтової товщі, контрастність жорсткостей на границях між шарами та потужність осадових відкладів. Перевага цих ґрунтових коефіцієнтів полягає в тому, що їх використання дозволяє перейти до обґрунтованого принципово нового опису взаємозв'язку властивостей ґрунту і параметрів сейсмічних впливів з використанням безперервних (не дискретних) величин. При прогнозуванні величини сейсмічних впливів такий підхід рекомендується американськими і європейськими нормативними документами, в яких замість

балів інтенсивності, сейсмічні впливи описуються фізичними параметрами сейсмічних коливань ґрунту: спектрами реакції або піковими прискореннями ґрунту PGA.

Перелік використаних джерел до Розділу 1

1. Abbis C. P. (1989). Seismic amplification – Mexico City. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 18(1), 78—88.
2. Aki K. (1988). Local site effect on ground motion. *Earthquake engineering and soil dynamics II: recent advances in ground-motion evaluation*
3. Anderson D.G., Richart F.E. (1976). Effects of straining on shear modulus of clays'. *J Geotech Eng Div ASCE* 102(9):975–987.
4. Archuleta R. J., Steidl J. H. (1998). ESG studies in the United States: results from borehole arrays in *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, K. Irikura, K. Kudo, H. Okada, and T. Sasatani (editors) Vol. 1, BAKLEMA, Rotterdam, 3-14.
5. Assimaki D., Kausel E., Whittle A. J. (2000). "Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils." *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 126(10), 859-869.
6. Boatwright J., Seekins L. C., Mueller C. S. (1991a). Ground motion amplification in the Marina. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81, 1117-1131.
7. Borchardt R. D., (2004). A theoretical model for site coefficients in building code provisions, *Procs. 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada, August 1-6.
8. Bozorgnia Y.; Bertero V. (2004). *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. CRC Press. ISBN 978-0-8493-1439-1.
9. Building Seismic Safety Council (BSSC). (1997). "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings, Part 1, Provisions and Part 2, Commentary. Rep. No. FEMA 302 and 303, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

10. Castro R.R., Pacor F., Bindi D., Franceschina G., Luzi L. (2004). Site response of strong motion stations in the Umbria, Central Italy, region. *Bull Seismol Soc Am* 94(2):576–590.
11. Chang C.Y., Mok C.M.W., Tang H.T. (1996). Inference of dynamic shear modulus from lotung downhole data. *J Geotech Eng ASCE* 122(8):657–665.
12. Chopra S., Kumar D., Rastogi B.K., Choudhury P., Yadav R.B.S. (2013). Estimation of site amplification functions in Gujarat region, India. *Nat Hazards* 65(2):1135–1155.
13. Darendeli M. (2001a). “Development of a new Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves.” Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Eng., Univ. of Texas, Austin.
14. Darendeli M.B., Stokoe K.H., Rathje E.M. and Roblee C.J. (2001b). “Importance of Confining Pressure on Nonlinear Soil Behavior and its Impact on Earthquake Response Predictions of Deep Sites,” Proc. 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey.
15. 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.
16. Delfosse Ribay E, Djeran Maigre I, Cabrillac R, Gouvenot D. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dyn Earthq Eng*;24, 461–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.02.004>.
17. Dolce M., Di Bucci D. (2017). Comparing recent Italian earthquakes. *Bull Earthq Eng* 15(2):497–533.
18. Dravinski M., (1983). Amplification of P, SV and Rayleigh Waves by Two Alluvial Valleys -J. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2(2), 66-77.
19. Eurocode 8 (2004). Design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings.
20. Federal Emergency Management Agency (FEMA); National Earthquake Hazards Reduction Program. Recommended Seismic Provisions for New Buildings

and Other Structures; FEMA P-1050-1/2015; Federal Emergency Management Agency (FEMA): Washington, DC, USA, 2015.

21. Field and Jacob Pehlivan, M., Rathje E. M., and Gilbert R. B. (2016). Factors influencing soil surface seismic hazard curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83, 180-190.

22. Field E.H., Jacob K.H. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bull Seismol Soc Am* 85(4):1127–1143.

23. Finn W. D. L., Semih S., Tezcan S. S., Ipek M., (1975). A Parametric Study of Soil Amplification: Proc. of the 5th European Conference on Earthquake Engineering. Vol. 1. No 20. Istanbul.

24. Gutenberg B. (1927). *Grundlagen der Erdlebenskunde*, Berlin.

25. Gutenberg B. (1957). Effects of ground on earthquake motion // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47, 221–250.

26. Ha Giang P. H., Van Impe P. O., Van Impe W. F., Menge P., Haegeman W. (2017). Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 371–379. doi:10.1016/j.soildyn.2017.06.016.

27. Hardin B. O., Drnevich V. P. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soils Mechanics and Foundation Engineering Division. ASCE* 98(SM7), 667—692. California, 102 p.

28. Idriss I. M. (1990). Response of soft soil sites during earthquakes. In: Duncan JM (ed) *Proceedings in H. Bolton seed memorial symposium*, 2, 273–290.

29. Idriss I. M., Seed H. B. (1970). Seismic response of soil deposits. *J Soil Mech Found Div Proc ASCE* 96, 9-103.

30. Idriss I. M., Seed H. B. (1968). "Seismic response of horizontal soil layers". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol. 96, N° SM4.

31. Joyner W. B., Chen A.T.F., (1975). Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65(5), 1315—1336.

32. Kausel E. (1974). "Forced vibrations of circular foundations on layered media." Rep. No. R74-11, Dept. of Civ. Engrg., MIT, Cambridge, Mass.
33. Kausel E., Roësset J. M. (1984). Soil amplification: some refinements. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(3), 116 – 123. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90041-X](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90041-X).
34. Kendzera A., Semenova Yu. (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, 1 – 5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902111>.
35. Kokusho T., (1999). Effect of nonlinear soil properties on seismic amplification in surface layers: 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (Lisbon), 913—918.
36. Kokusho T., Matsumoto M., (1998). Nonlinearity in site amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake. *Soils Found. Special Issue*, 1-9.
37. Kramer S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
38. Kumar D., Kundu S., Kumhar R. Gupta S. (2020). Vibrational analysis of Love waves in a viscoelastic composite multilayered structure. *Acta Mech.*, 231, 4199–4215.
39. Matasovic N. (1993). "Seismic Response of Composite Horizontally-Layered Soil Deposits." Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, CA.
40. McManus K.J. (2003). 'Earthquake Resistant Foundation Design,' Proc. N.Z. Geotech. Soc. Symp., Tauranga, N.Z.
41. Midorikawa S. (1993). Nonlinearity of site amplification during strong ground shaking. *J. Seism. Soc. Japan* 46, 207-216.
42. Paolucci R., Fugini R., Petrini L. (2013). 'Introducing Dynamic Nonlinear Soil-Foundation-Structure Interaction Effects in Displacement-Based Seismic Design,' *Earthquake Spectra*, 29, 2, 475–496.

43. Pavlenko O.V. (2020). Modern methods for estimating local effects of the earthquakes, *Physics of the Earth*, 56, 5, 59–69. <https://doi.org/10.1134/S1069351320040060>.
44. Power M., Borchardt R., Stewart J. (2004). Site amplification factors from empirical studies//NGA Working Group №5. September, 2004.
45. Pratt T. L., Horton J. W., Jr. Muñoz J., Hough S. E. Chapman M. C., Olgun C. G. (2017). Amplification of earthquake ground motions in Washington, DC, and implications for hazard assessments in central and eastern North America. *Geophysical Research Letters*, 44(24), 12,150 – 12,160. <https://doi.org/10.1002/2017GL075517>.
46. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. (1998). User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 54 p.
47. Richards R., Elms D.G., and Budhu M. (1990). 'Dynamic Fluidization of Soils,' *J. Geotech. Engrg.*, 116, 740–759.
48. Roblee C., Chiou B. (2004). A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses, *Proceedings, International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response*, University of California, Berkeley, CA.
49. Sahadewa A. (2014). "In-situ Assessment of the Linear and Nonlinear Dynamic Properties of Municipal Solid Waste." A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering) in the University of Michiga.
50. 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.
51. Seed H. B., Idriss I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48.

52. Seed H. B., Idriss I. M. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Monograph, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA.
53. Semblat J.F., Pecker A. (2009). Waves and vibrations in soils: earthquakes, traffic, shocks, construction works, IUSS Press, Pavia, Italy, 499.
54. Semblat J.F.; Kham M.; Parara E.; Bard P.Y.; Pitilakis K.; Makra K.; Raptakis D. (2005). "Seismic wave amplification: Basin geometry vs soil layering". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 25 (7–10): 529–538. doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.003.
55. Semenova Yu. (2021). Modeling the influence of local soil conditions on the earthquake motion in the territory of Kyiv. *Colloquium-journal*, 3(90), 16-18 DOI: 10.24412/2520-2480-2021-390-16-18.
56. Semenova Yu., Kendzera O. (2020). Determination of site amplification in the South Ukrainian NPP // *Norwegian Journal of development of the International Science*, 1, 46, 9-12.
57. Silva W., Darragh, R., Gregor N., Martin G., Abrahamson N., Kircher C., (2000). Reassessment of site coefficients and near-fault factors for building code provisions, USGS NEHRP program report 98-HQ-GR-1010.
58. Singh S.K., Mena E., Castro R. (1988). Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(2), 451-477.
59. *Soil Dynamics and Earthquake Geotechnical Engineering IGC 2016 Volume 3*. (2019). Editors: Adimoolam, Boominathan, Banerjee, Subhadeep (Eds.) *Lecture Notes in Civil Engineering*, 15, Springer Nature Singapore, 274.
60. *Soil Mechanics: Basic Concepts and Engineering Applications*. (2002). A Aysen (Univ of Southern Queensland, Australia). Balkema Publ, Rotterdam, Netherlands, 459.

61. TCEGE (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering) (1999): Manual for zonation on seismic geotechnical hazards (Revised Version): Japanese Geotechnical Society.
62. The NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, 1997 Edition, 2 volumes and maps (FEMA Publication 302 and 303)—printed copies expected to be available in early 1998.
63. Towhata I. (2008). Chapter 10 laboratory tests on dynamic properties of soils. *Geotech Earthq Eng Earthq Geotech Eng*, 180–216.
64. Tuladhar R., Maki T., Mutsuyoshi H. (2008). Cyclic behavior of laterally loaded concrete piles embedded into cohesive soil, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37 (1), 43-59.
65. Turkish Building Earthquake Code, TBEC-2018. Turkish Earthquake Code: Specifications for Building Design Under Earthquake Effects; Ministry of Public Works and Settlement: Ankara, Turkey, 2018.
66. Vucetic M., Dobry R. (1991). “Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response.” *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, 117, 1, 89-107.
67. Wood H. (1908). Distribution of apparent intensity in San Francisco, in *The California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Inst. Washington Pub. 87, Washington, D.C., 220-245.*
68. Yoshida N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis; Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Series, Volume 36, Springer: Dordrecht, The Netherlands. 365.* <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.
69. Айзенберг Я. М. (2018). Строительная наука против стихии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 51-59.
70. Алешин А. С. (2010). Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Москва: ООО "Светоч Плюс", 293 с.
71. Алешин А. С. (2017). Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. Москва: Научный мир, 300 с.

72. Алешин А. С. (2018). О грунтовых коэффициентах. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2, 6-13.
73. Алешин А. С. (2013). Основные понятия сейсмического микрорайонирования: категория, балл, модель // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 5, 9-13.
74. Алешин А. С. (2015). Основы континуальной теории сейсмического микрорайонирования//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 5, 18-26.
75. Аптикаев Ф. Ф. (2012). Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 176 с.
76. Аптикаев Ф. Ф., Нерсесов И.Л. (1980). Методика детального сейсмического районирования в количественных характеристиках сейсмических колебаний - Детальное сейсмическое районирование.-Москва: Наука, 96-100.
77. Аптикаев Ф. Ф., Шебалин Н. В. (1988). Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // Исследования по сейсмической опасности. Вопросы инженерной сейсмологии. М.:Наука, 29, 98-108.
78. Будівництво в сейсмічних районах України ДБН В.1.1-12:2014. (2014). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 110 с
79. Гусев А. А. (2003). Некоторые вопросы сейсмологического обоснования норм сейсмостойкого проектирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 1, 32-36.
80. Гусев А. А. (2011). О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений (Часть 1) // Инженерные изыскания, 10, 20–29.
81. Гусев А. А. (2002). О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Физика Земли, 12, 35 - 44.

82. Гусев А. А., Шумилина Л. С. (1995). Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 2 – 3, 289 - 299.

83. Інженерні вишукування для будівництва. Сейсмічне мікрорайонування. Загальні положення. Методичні рекомендації (перша редакція) (2012). Ред. Мар'єнков М., Хавкін О., Немчинов Ю. – Київ: Мінрегіон України, 20 с.

84. Кендзера А. В. (1996). Моделирование расчетных акселерограмм вранчевских землетрясений для промышленной площадки ЧАЭС. В кн.: Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. Київ: Наук. думка, 3, 29—38.

85. Кендзера А. В., Семенова Ю. В. (2021а). Вариации интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний на территории Киева, Геофизический журнал, 1(43), 129-141. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225543>.

86. Кендзера А.В., Семенова Ю.В. (2016). Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок. - Геофизический журнал, 2, 3-18.

87. Кендзера А.В., Скляр А.М., Роман А.А., Исичко Е.С., Илиеш И.И., Стародуб Г.Р., Князева В.С. (1989). О возможности использования эмпирических передаточных функций среды при микрорайонировании территорий со сложным геологическим строением // Оценка эффекта сильных землетрясений. Москва: Наука, 82-89.

88. Кендзера О. В. (2015а). Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України). Вісник НАН України, 2, 44—57. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnanu_2015_2_10.

89. Кендзера О. В. (2015б). Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні. Укр. географ. журн, 3, 9—15. <http://dx.doi.org/10.15407/ugz2015.03>.

90. Кендзера О.В., Микуляк С.В., Семенова Ю.В., Скуратівський С.І. (2020). Моделювання сейсмічної реакції прошарку ґрунту в рамках нелокальної

моделі суцільного середовища // Геофизический журнал, 42, 3, 47-58 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204700>.

91. Кендзера О. В., Семенова Ю. В. (2018). Вплив осадової товщі на сейсмічні коливання на території Ташлицької гідроаккумуляційної електростанції // Геодинаміка, 1(24), 91-99. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.091>

92. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2019). Расчетные акселерограммы для прямого динамического метода определения сейсмических нагрузок // Геофизический журнал, 41(4), 210-216. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177389>.

93. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2021б). Спектральне підсилення сейсмічних коливань ґрунтами на території Києва // Допов. Нац. акад. наук Укр., 2, 65-70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.11.065>.

94. Кендзера О.В., Семенова Ю.В., Вербицький С.Т., Єгупов В.К., Лісовий Ю.В. (2019). Вплив локальних ґрунтових умов на сейсмічні коливання майданчика Ташлицької ГАЕС // Наука та будівництво, 2, 11-19. DOI: [10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65](https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65).

95. Курбацкий Е. Н., Косауров А. П. (2016). К вопросу о пересчете балльности в ускорения колебаний грунта // Инженерные изыскания, 14, 42-52.

96. Медведев С. В. (1962). Инженерная сейсмология. Москва: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 283 с.

97. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник (2015). Ред. Л. Н. Шутенко, А. Г. Рудь, О. В. Кичаева и др.; под. ред. Л. Н. Шутенко; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 501 с.

98. 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.

99. Окамото Ш. (1980). Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 342 с.
100. Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. (1988). Отв. ред. О. В. Павлов. Москва: Наука, 224 с.
101. Павленко О.В. (2020). Современные методы оценки локальных эффектов землетрясений. Физика Земли, 5, 59–69. <https://doi.org/10.3185>.
102. Рекомендации по сейсмическому микрорайонированию при инженерных изысканиях для строительства. (1985). Под ред. С.А.Федорова. – М: Госстрой СССР, 136с.
103. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. (1986). М.: Госстрой РСФСР, 17 с.
104. РСН 65-87 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. (1988). Москва: Госстрой РСФСР, 14 с.
105. СНиП II-7-81 Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. (1991). Госстрой СССР. – М.: АПП ЦИТП, 50 с.
106. Старостенко В.І., Кендзера О.В., Лісовий Ю.В., Семенова Ю.В. (2011). Розвиток сейсмологічної мережі на території України для цілей сейсмічного захисту // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища, 19, 144-150.
107. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф., Алказ В.Г., Гусев А.А., Ерохин Л.Ю., Заградник И, Кендзера А.В., Коган Л.А., Лутиков А.И., Попова Е.В., Раутиан Т.Г., Чернов Ю.К. (1993). Методы оценки сейсмических воздействий (пособие). // Вопросы инженерной сейсмологии, Вып.34, - М.: Наука, 5-94. http://www.emsd.ru/~gusev/main_ru.htm

РОЗДІЛ 2. ПАРАМЕТРИ СЕЙСМІЧНИХ КОЛИВАНЬ ҐРУНТУ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ПРИ СЕЙСМОСТІЙКОМУ ПРОЄКТУВАННІ ТА БУДІВНИЦТВІ

Будь-яка періодична функція, яка задовольняє певні умови, може бути виражена за допомогою теореми Фур'є як сума ряду синусоїд різної частоти, амплітуди та фази [Kramer, 1996; Бат, 1980]. Теорему Фур'є у 1807 р., винайшов барон Жан Батіст-Жозеф Фур'є, яка на сьогоднішній день стала основним методом аналізу в частотній області для широкого кола інженерних задач, хоча в часи винаходу викликала скептицизм у сучасників.

Згідно теореми Фур'є функція $f(t)$, яка має видимий період 2π і задовольняє умови Діріхле, може бути представлена наступним нескінченним рядом Фур'є:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t), \quad (2.1)$$

де $\omega_n = 2\pi n / T_f$; a_0, a_n, b_n – постійні, які знаходяться шляхом множення (2.1) по черзі на $\cos(0)t, \cos nt, \sin nt$ та інтегрування відносно t по періоду 2π з використанням властивості ортогональності функцій синуса та косинуса:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin mt \sin ntdt = \int_{-\pi}^{\pi} \cos mt \cos ntdt = \begin{cases} \pi, & (m = n) \\ 0, & (m \neq n) \end{cases}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin mt \cos ntdt = 0 \text{ для всіх } m \text{ і } n, \text{ де } m \text{ і } n \text{ – цілі числа.}$$

В результаті інтегрування отримаємо:

$$a_0 = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} f(t) dt,$$

$$a_n = \frac{2}{T_f} \int_0^{T_f} f(t) \cos \omega_n t dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T_f} \int_0^{T_f} f(t) \sin \omega_n t dt.$$

Член a_0 – представляє собою середнє значення $f(t)$ в діапазоні від $t = 0$ до $t = T_f$, його значення дорівнює нулю в багатьох інженерних геотехнічних випадках. Частоти ω_n не довільні; швидше, вони рівномірно розподілені з постійним збільшенням частоти $\Delta\omega_n = 2\pi/T_f$.

Ряд Фур'є представляє функцію точно тільки для $n = \infty$. Якщо ряд усікається до деякого кінцевого значення n , ряд Фур'є тільки дає наближення функції. Однак для багатьох функцій апроксимація може бути досить хорошою, навіть, якщо n відносно мале. Ця характеристика часто використовується з великою перевагою при динамічному аналізі як ґрунтів так і конструкцій [Kramer, 1996].

Ряд Фур'є надає повний опис коливання ґрунту, оскільки коливання може бути повністю відновлене за допомогою зворотного перетворення Фур'є.

Запис землетрусу в часовій області містить динамічні характеристики коливань ґрунту, при цьому максимальна амплітуда сейсмічних коливань є одним з найважливіших параметром. Динамічними характеристиками сейсмічних хвиль називається сукупність залежностей, які визначають характер коливань частинок середовища в часі і в просторі при поширенні хвиль [Берзон та ін., 1962].

Найбільш важливі параметри сейсмічних коливань ґрунту для інженерних розрахунків сейсмостійкого проектування та будівництва це: амплітудні пікові параметри коливань ґрунту (пікові прискорення, пікові швидкості та пікові зміщення ґрунту), тривалість коливань та частотний склад. Частотний склад сейсмічних коливань чинить суттєвий вплив на реакцію конструкції при сейсмічних коливаннях. Найбільш небезпечними є явища, коли частотний склад коливань ґрунту і власні частоти структури є близькими один до одного.

Тривалість сейсмічних коливань також суттєво впливає на сейсмічний ефект. Сейсмічні коливання з помірним піковим прискоренням та зі значною тривалістю можуть завдати більшої шкоди, ніж сейсмічні коливання з більшим піковим прискоренням і меншою тривалістю.

2.1. Амплітудні параметри сейсмічних коливань

Найпоширеніший спосіб опису сейсмічних коливань ґрунту – це історія зміни амплітуди в часі. Параметром коливання може бути прискорення, швидкість або зміщення. Як правило, лише одна з цих величин вимірюється, а інші безпосередньо розраховуються через виміряну величину шляхом інтегрування та / або диференціювання.

Амплітуда сейсмічних хвиль залежить від: а) умов збурення коливань (енергії сейсмічного поштовху, сили удару, величини заряду вибухової речовини та ін.); б) фільтруючих властивостей середовища і приймальної апаратури; в) диференціації швидкостей сейсмічних хвиль на границях розділу (тобто від сейсмічної жорсткості середовища по різні боки границі); г) особливостей форми відбиваючих і заломлюючих границь. У реальних геологічних середовищах відношення швидкостей поздовжніх хвиль на границях розділу змінюється у вузьких межах від 0,5 до 0,9, а в осадових породах - карбонатних і піщано-глинистих - іноді спостерігається і більш слабка диференціація (0,95-0,97).

2.1.1. Пікове прискорення ґрунту

Пікове прискорення ґрунту (Peak Ground Acceleration PGA) є мірою максимальної амплітуди коливань і визначається як найбільше абсолютне значення прискорення запису землетрусу в часовій області.

Найбільш часто використовуваною мірою амплітуди сейсмічного коливання ґрунту є пікове горизонтальне прискорення (peak horizontal acceleration PHA). PHA для даної компоненти коливання - це найбільше (абсолютне) значення горизонтального прискорення, отримане з акселерограми горизонтальної компоненти. Беручи векторну суму двох ортогональних компонентів, можна отримати максимальну результуючу PHA (напрямок якої зазвичай не збігається з жодною з вимірюваних складових).

Горизонтальні прискорення зазвичай використовуються для опису коливання ґрунту через їх природне відношення до інерційних сил; найбільші

динамічні сили, індуковані в певних типах конструкцій (тобто дуже жорстких конструкціях), тісно пов'язані з РНА. РНА також можна корелювати з інтенсивністю землетрусу [Trifunac and Brady, 1975a; Murphy and O'Brien, 1977; Krinitzsky and Chang, 1987]. Хоча ця кореляція далеко не точна, вона може бути корисною для оцінки РНА, коли доступна лише інформація про інтенсивність, як у випадках землетрусів, що сталися до того, як були доступні інструментальні записи сильних рухів. Запропоновано низку співвідношень інтенсивності та прискорення, деякі з яких показані на рис 2.1. Використання співвідношень інтенсивності та згасання також дозволяє оцінити просторову зміну пікового прискорення за картами ізосейст історичних землетрусів.

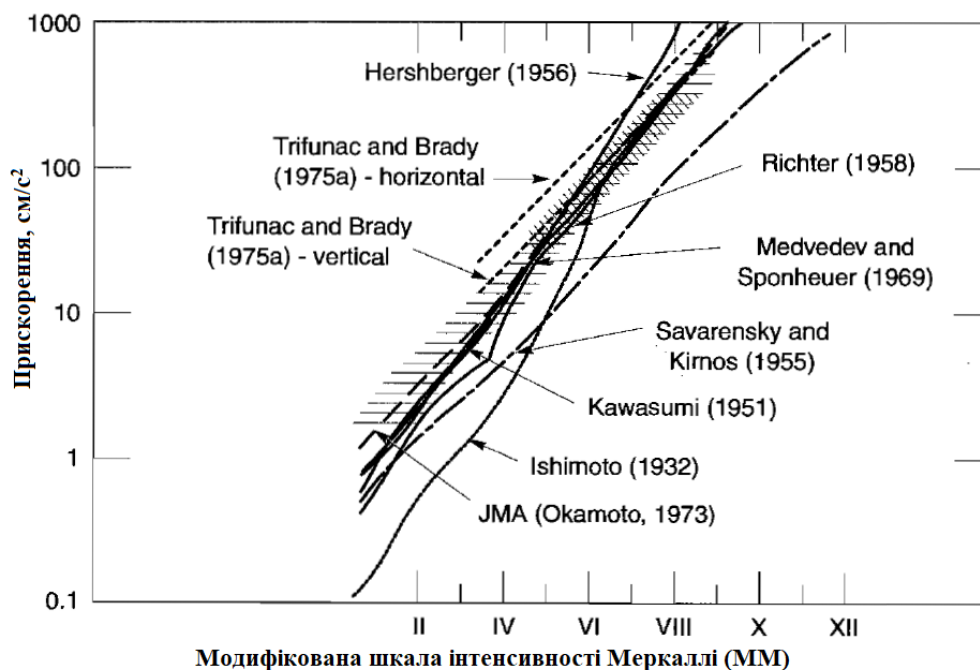


Рис. 2.1 Запропоновані взаємозв'язки між РНА та модифікованою шкалою інтенсивності Меркаллі ММ (Використовується з дозволу Сейсмологічного товариства Америки [Kramer, 1996]).

Вертикальним прискоренням приділяється менше уваги в інженерній сейсмології, ніж горизонтальним, головним чином тому, що запаси міцності проти статичних вертикальних сил під дією сили тяжіння в будівлях зазвичай забезпечують належний опір динамічним силам індукованими вертикальними

прискореннями під час землетрусів. В інженерних цілях пікове вертикальне прискорення (PVA) часто вважається двома третинами пікового горизонтального прискорення PHA [Newmark and Hall, 1982; Kramer, 1996]. Однак, останнім часом, відмічається що відношення PVA до PHA досить мінливе, але загалом перевищує, ніж дві третини в близькій зоні вогнища помірного чи інтенсивного землетрусів і складає менше двох третин на великих відстанях [Campbell, 1985; Abrahamson and Litehiser, 1989]. Таким чином, для інженерних цілей горизонтальне PHA вважається загальним піковим прискоренням ґрунту (PGA).

Сейсмічна реакція досить жорстких конструкцій, які характеризуються високими значенням власних частот зазвичай пов'язана з PGA. Хоча PGA не є надійним показником потенційного пошкодження від сейсмічних коливань ґрунту; завдяки своєму тісному зв'язку зі спектром реакції та зручністю масштабування спектра реакції, PGA широко використовується в інженерних програмах.

Інженери-геотехніки традиційно частіше використовують прискорення, а не швидкість чи переміщення, оскільки PGA безпосередньо пов'язане з динамічними силами, які землетруси викликають на ґрунтовій масі.

Для інженерних аналізів землетрусів PGA є одним із найскладніших параметрів для визначення. Адже цей параметр являє собою прискорення, яке у майбутньому буде спричинене землетрусом. Оскільки передбачити землетруси неможливо, величина пікового прискорення ґрунту повинна базуватися як на даних про попередні землетруси так і дослідженнях зміни величини PGA в ґрунтових шарах. Часто при визначенні пікового прискорення ґрунту використовують співвідношення згасання. Зв'язок згасання визначається математичним зв'язком, який використовується для оцінки пікового прискорення ґрунту на певній відстані від землетрусу.

Хоча PGA широко використовуваним параметром при визначенні рівня сейсмічного впливу, в нормах МАГАТЕ по безпеці атомної енергетики відмічається [SSG-25, 2014; NS-G-2.13, 2014], що здатність сейсмічного

коливання ґрунту викликати пошкодження конструкцій, систем і елементів, що володіють пластичною реакцією, не дуже добре співвідноситься з рівнем PGA. Визнано, що інші параметри, такі як швидкість, переміщення, тривалість значного переміщення, спектральне прискорення, спектральна щільність енергії і кумулятивна абсолютна швидкість, – повинні відігравати важливу роль при обґрунтованій оцінці впливу сейсмічного коливання ґрунту на конструкції, системи і елементи.

Пікові вертикальні прискорення можуть бути досить великими. Наприклад $PVA = 1,74 g$ було зареєстроване між розломами Імперіал та Броулі в результаті землетрусу в Імперській долині 1979 року [Kramer, 1996]. Коливання ґрунту з високими піковими прискореннями не завжди є більш руйнівними, ніж коливання з меншими піковими прискореннями. Дуже високі пікові прискорення, які тривають дуже короткий проміжок часу, можуть нанести незначну шкоду багатьом типам конструкцій. Низка землетрусів призводили до пікових прискорень, що перевищують $0,5 g$, але не завдали значної шкоди конструкціям, оскільки пікові прискорення відповідали високим частотам, а тривалість землетрусу не була довгою. Хоча пікове прискорення є дуже корисним параметром, воно не надає інформації про частотний склад або тривалість коливання; тому воно повинно бути доповненим додатковою інформацією для точної характеристики коливання ґрунту.

2.1.2. Пікова швидкість ґрунту

Пікова швидкість ґрунту (peak ground velocity) - це найбільше абсолютне значення швидкості запису землетрусу в часовій області. Цей амплітудний параметр є чутливим до проміжних частотних складових сейсмічних коливань (оскільки швидкість менш чутлива до високочастотних компонентів коливань ґрунту) і характеризує реакцію конструкцій, чутливих до цих проміжних діапазонів коливань ґрунту. До таких конструкцій відносяться, наприклад, високі будівлі, мости тощо. Пікова швидкість ґрунту також корелює з

інтенсивністю землетрусу [Trifunac and Brady, 1975a; Krinitzsky and Chang, 1987].

2.1.3. Пікове зміщення

Пікове зміщення (peak ground displacement) відображає амплітуду низькочастотних компонентів сейсмічних коливань ґрунту. Однак точне визначення цього параметру є ускладненим [Campbell, 1985; Joyner and Boore, 1988], оскільки помилки в обробці записів та чисельному інтегруванні акселерограм сильно впливають на оцінку амплітуди часового запису зміщення. В результаті пікове зміщення рідше використовується в якості параметра коливання ґрунту, ніж пікове прискорення або пікова швидкість.

2.2. Тривалість коливань

Тривалість інтенсивного коливання ґрунту може чинити сильний вплив на наслідки землетрусу. Багато фізичних процесів, такі як зменшення жорсткості та міцності певних типів конструкцій, накопичення тиску порової води в рихлих насичених пісках та інші – є чутливими до тривалості навантаження або напруження під час землетрусу [Kramer, 1996]. Короткочасне коливання може не спричинити достатньої зміни напрямку навантаження для руйнівної реакції, яка б могла накопичуватись в структурі, навіть якщо амплітуда коливання висока. З іншого боку, коливання з помірною амплітудою, але великою тривалістю, може спричинити достатньо реверсивного навантаження, щоб завдати значної шкоди. Тривалість сильного коливання пов'язана з часом, необхідним для вивільнення накопиченої енергії деформації при розриві вздовж розлому. Зі збільшенням довжини або площі розриву розлому збільшується час, необхідний для розриву. В результаті тривалість інтенсивного коливання збільшується зі збільшенням магнітуди землетрусу. Незважаючи на те, що цей взаємозв'язок підтверджується емпіричними даними протягом багатьох років, досягнення в моделюванні

механізмів вогнищ [Hanks and McGuire, 1981] забезпечили теоретичну підтримку, вказавши що тривалість повинна бути пропорційною кубічному корню сейсмічного моменту. Коли відбувається двосторонній розрив (тобто розрив, який поширюється в протилежних напрямках від вогнища, як у випадку землетрусу в Лома Прієті 1989 р.), тривалість інтенсивного коливання може бути значно меншою. Акселерограма землетрусу, як правило, містить усі прискорення з моменту початку землетрусу до моменту, коли коливання повернулись до рівня фонового шуму. В інженерних цілях представляє інтерес лише частина акселерограми з інтенсивним коливанням. До проблеми оцінки тривалості інтенсивного коливання на акселерограмі були застосовані різні підходи. Згідно [Bolt, 1969] тривалість інтенсивного коливання на записі визначається як час між першим та останнім перевищеннями порогового прискорення (зазвичай 0,05 g). Інше визначення тривалості інтенсивного коливання [Trifunac and Brady, 1975b] базується на інтервалі часу між точками, в яких було зафіксовано 5% і 95% загальної енергії. Швидкість зміни кумулятивного середньоквадратичного прискорення (середньоквадратичне значення) також була використана як основа для оцінки тривалості інтенсивного коливання [McCann and Shah, 1979]. Поняття спектральної щільності потужності також можуть бути використані для визначення тривалості інтенсивного коливання [Vanmarcke and Lai, 1977]. В літературі пропонуються і інші методи визначення тривалості інтенсивного коливання [Perez, 1974; Trifunac and Westermo, 1977]. Оскільки ця тривалість неявно відображає інтенсивність коливання, тому саме ця тривалість інтенсивного коливання на записі землетрусу найчастіше використовується для інженерних цілей сейсмостійкості. Тривалість також була вираженою через еквівалентні цикли коливання ґрунту. Один із таких підходів був розроблений у поєднанні з ранньою процедурою оцінки потенціалу розрідження [Seed, Mori et al., 1975].

Згідно [РБ-006-98, 1998] в якості параметра тривалості коливань використовується ширина імпульсу τ , тобто проміжок часу, протягом якого рівень коливань перевищує $a_{max} / 2$. Схема вимірювання амплітуди і ширини

імпульсу показана на рис. 2.2. Представлені випадки простих за формою коливань (рис. 2.2, а) і запис хвильової групи, розділеної проміжком часу Δt , протягом якого $a \leq a_{\max}/2$ (рис. 2.2, б). У разі складних коливань типу імпульс вважається єдиним при $\Delta t \leq 2c$. Тоді $t = \Delta t_1 + \Delta t + \Delta t_2$. В іншому випадку ($\Delta t > 2c$) розглядаються два окремих імпульса.

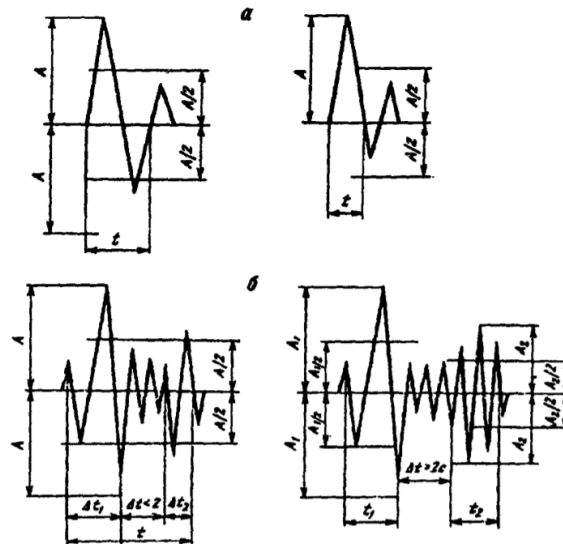


Рис. 2.2 Схема вимірювання ширини імпульсу: для простих коливань (а); для коливань складної форми (б)

2.3. Переважаючий період

Переважаючий період є корисним показником, хоча і дещо грубим представленням частотного складу коливання ґрунту. Переважаючий період T_p визначається як період коливання, що відповідає максимальному значенню амплітудного спектра Фур'є. Щоб уникнути надмірного впливу окремих піків амплітудного спектра Фур'є, перевагаючий період часто отримують із згладженого спектра. Незважаючи на те, що перевагаючий період надає деяку інформацію щодо частотного складу коливання, все ж доведено, що сейсмічні коливання з кардинально різним частотним складом можуть мати однаковий перевагаючий період. Приклад однакового перевагаючого періоду амплітудних спектрів Фур'є сейсмічних коливань з кардинально різним частотним складом проілюстровано на рис. 2.2. Тому використання

переважаючого періоду є грубим наближенням до опису частотного складу коливання.

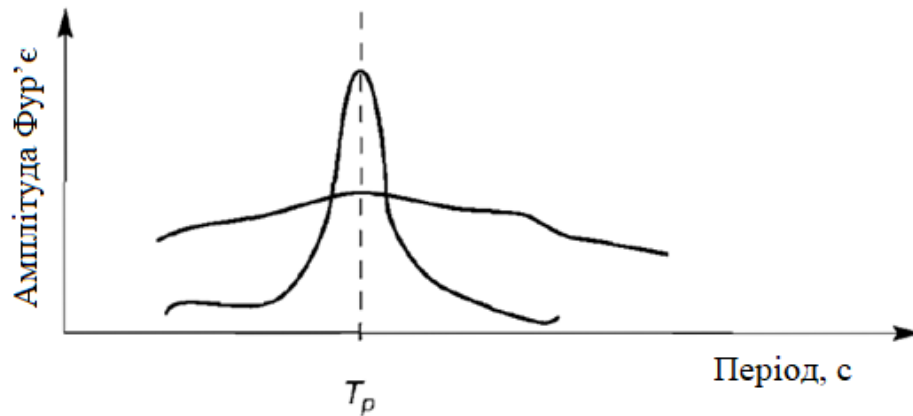


Рис. 2.2 Два амплітудні спектри Фур'є з однаковим переважаючим періодом та різним частотним складом. Верхня крива описує широко смугове коливання, а нижня – вузько смугове коливання

Згідно чинних будівельних норм України Додатку В [ДБН В.1.1-12:2014, 2014] значення переважаючого періоду коливань неоднорідних ґрунтових основ, якщо характеристики різних шарів основи мало відрізняються один від одного та при відсутності експериментальних даних допускається визначати за наступними формулами:

$$T_0 = 4H_s \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \rho_k \left[H_k + \frac{H_s}{\pi} \left(\sin \frac{\pi h_k}{H_s} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H_s} \right) \right]}{\sum_{k=1}^n G_k \left[H_k - \frac{H_s}{\pi} \left(\sin \frac{\pi h_k}{H_s} - \sin \frac{\pi h_{k-1}}{H_s} \right) \right]}} \quad (2.2)$$

або

$$T_0 = \frac{4H_s}{V_s^{cp}}, \quad (2.3)$$

де $V_s^{cp} = \frac{\sum_{k=1}^n H_k}{\sum_{k=1}^n \frac{H_k}{V_{sk}}}$, H_s – загальна потужність неоднорідної багат шарової

товщі ґрунту до корінних порід з $V_s > 800$ м/сек, V_s^{cp} середня швидкість поперечної хвилі, зважена по потужності.

$H_k, \rho_k, G_k, V_{sk} = \sqrt{G_k / \rho_k}$ - відповідно потужність, щільність, модуль зсуву та швидкість розповсюдження поперечних хвиль k -ого шару;

$$h_k = \sum_{i=1}^k H_i \quad (h_0 = 0, h_n = H_s);$$

n – кількість шарів.

В якості розрахункового значення T_0 приймається найбільше з двох значень, обчислених за формулами (2.2) і (2.3).

Більш точніші значення переважаючого періоду можна отримати, наприклад враховуючи відбиття хвилі. Якщо розглядати тільки одноразове відбиття від поверхні ґрунтової товщі і від основи, отримаємо наступне рівняння [Sawada and Kishimoto 2001]:

$$T_r = \frac{3 \sum_{i=1}^N S_i t_i^3 + \sqrt{9 \left(\sum_{i=1}^N S_i t_i^3 \right)^2 - 8 \left(\sum_{i=1}^N S_i t_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N S_i t_i^4 \right)}}{4 \sum_{i=1}^N S_i t_i^2}, \quad (2.4)$$

де

$$t_i = \sum_{k=1}^i \frac{4H_k}{V_{sk}} = \sum_{k=1}^i \left(4H_k \sqrt{\frac{\rho_k}{G_k}} \right), \quad S_i = \frac{\sqrt{\rho_i G_i} - \sqrt{\rho_{i+1} G_{i+1}}}{\sqrt{\rho_i G_i} + \sqrt{\rho_{i+1} G_{i+1}}},$$

ρ і G - щільність і модуль зсуву в кожному шарі, відповідно, а нижні індекси вказують номери шарів, з відліком від поверхні ґрунтової товщі. Якщо значення квадратного кореня рівняння (2.4) стає негативним, номер шару i і N зменшуються по одному, так щоб значення квадратного кореня стало позитивним. Це відбувається, коли існує границя між шарами з великою різницею жорсткостей шарів, і нехтуючи найглибшим шаром, зменшується N .

Як правило, переважаючі періоди розраховані за наведеними формулами іноді переоцінюють фактичний переважаючий період в кілька разів. Це видно з рис.2.3, де порівнюються переважаючі періоди, розраховані за рівняннями з періодами T_s – отриманими за даними теоретичних частотних характеристик [Yoshida, 2015].

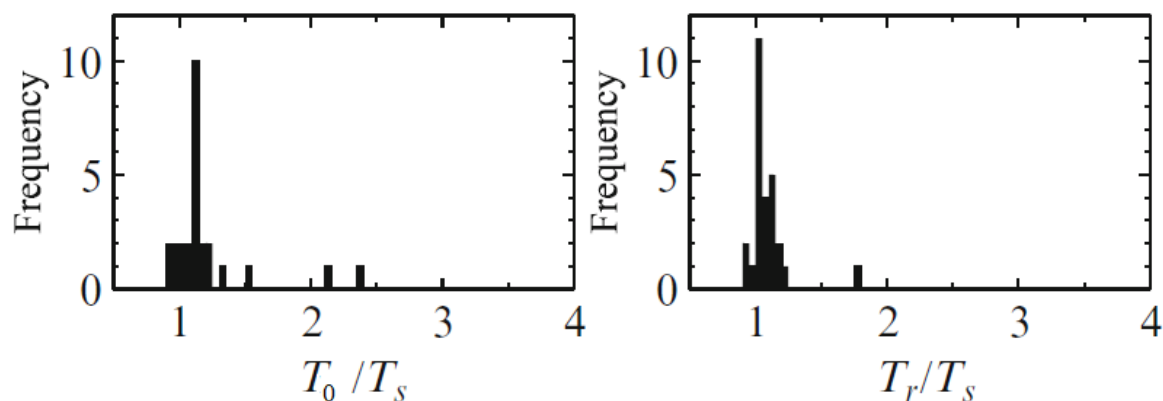


Рис.2.3 Порівняння переважаючих періодів, отриманих різними методами.

2.4. Розрахункові акселерограми, велисограми та сейсмограми

Акселерограма (велисограма, сейсмограма) - залежність зміни в часі прискорення (швидкості, зміщення) коливань ґрунту для певного напрямку.

Розрахункова або синтезована акселерограма (велисограма, сейсмограма) – це акселерограма (велисограма, сейсмограма) отримана аналітичним шляхом на основі статистичної обробки та аналізу ряду акселерограми (велисограми, сейсмограми) і (або) спектрів реальних землетрусів з урахуванням місцевих сейсмічних умов.

Пікове прискорення акселерограми визначається як максимальне значення прискорень або абсолютне значення векторної суми 2 горизонтальних і вертикальної компонент. Вертикальна складова прискорення зазвичай має дещо менші амплітуди, ніж горизонтальні (близько 60-70%) [РБ-006-98, 1998].

Обидві горизонтальні складові, як правило, співрозмірні і немає різкої залежності амплітуд від кута між напрямком коливання і напрямком на епіцентр.

За акселерограмою можна визначити:

- амплітудний рівень коливань;
- тривалість коливань;
- спектральний склад коливань.

За акселерограмою амплітудний рівень коливань може бути заданий:

- максимальною амплітудою;
- максимальним розмахом коливань;
- середньоквадратичною амплітудою коливань, що дорівнює кореню квадратному із суми амплітуд на показаній ділянці запису;
- спектральним рівнем на фіксованих періодах.

Для переважної більшості акселерограми співвідношення $\frac{a_{max}}{\bar{a}^2}$, де a_{max} - амплітуди максимального прискорення і \bar{a}^2 - величина середньоквадратичного прискорення, що лежить в інтервалі значень 2,41-2,47 [Vanmarke, Lai, 1980].

Слід мати на увазі, що з інженерної точки зору величина a_{max} може бути не показовою в разі одиничного викиду великої амплітуди, або коли період коливань з максимальною амплітудою лежить поза межами максимуму частотної характеристики коливань споруд.

2.5. Спектральний склад сейсмічних коливань

Сейсмічна реакція будь-якого об'єкта (будівля, схили, ґрунтові відклади тощо) є дуже чутливою до частоти сейсмічного навантаження. Реакція будь-якої конструкції на сейсмічні коливання ґрунту, залежить від співвідношення між власними частотами і частотним складом коливань ґрунту. Землетруси спричиняють складне навантаження компонентами руху, що охоплюють широкий діапазон частот. Частотний склад описує розподіл амплітуди коливань ґрунту між різними частотами. Оскільки частотний склад коливань землетрусу буде сильно впливати на ефекти цих коливань, характеристика коливання не може бути повною без урахування його частотного складу [Kramer, 1996].

Для опису сейсмічних коливань ґрунту в частотній області в інженерних цілях використовуються три типи спектрів: спектр Фур'є, спектр потужності та спектр реакції. Спектр Фур'є і спектр потужності є стохастичними методами, а спектр реакції класифікується як детермінований.

Спектральна функція неперіодичного сигналу $f(t)$ має наступний вигляд [Харкевич, 1962; Саваренский, 1972; Бат, 1980]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt = A(\omega) - iB(\omega),$$

де ω – кутова частота, $S(\omega)$ - комплексна функція кутової частоти, яка повністю визначається амплітудним $|S(\omega)|$ і фазовим $\varphi(\omega)$ спектрами, а саме $S(\omega) = |S(\omega)| e^{-i\varphi(\omega)}$.

Амплітудний і фазовий спектри визначаються через коефіцієнти Фур'є $A(\omega)$ і $B(\omega)$:

$$|S(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{B(\omega)}{A(\omega)},$$

$$\text{де } A(\omega) = \int_0^t f(t) \cos \omega t dt, \quad B(\omega) = \int_0^t f(t) \sin \omega t dt.$$

Повна енергія сигналу $f(t)$, згідно теореми Парсеваля визначається як інтеграл квадрату модуля його амплітудного спектра:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega,$$

$$|S(\omega)|^2 = A^2(\omega) + B^2(\omega),$$

де $|S(\omega)|^2$ – енергетичний спектр або спектральна щільність енергії.

В інженерних оцінках велика частина операцій здійснюється з використанням модуля спектра, тобто амплітудного спектра Фур'є.

Спектр Фур'є або спектр потужності в поєднанні з фазовою інформацією (через фазовий спектр) може повністю описати коливання ґрунту (за умови, що коливання ґрунту є стаціонарним), тоді як спектр реакції не може. З іншого боку, використання спектра Фур'є та спектра потужності, як правило, вимагає, щоб сейсмічне збурення було близьким до стаціонарного процесу, що має місце лише для центральної частини запису землетрусу (інтенсивного коливання). Більше того, з інженерної точки зору, спектр реакції є більш зручним і цінним інструментом для опису коливань ґрунту та безпосередньої оцінки впливу сейсмічних коливань на реакцію конструкції.

2.5.1. Амплітудний спектр Фур'є

Графік залежності амплітуди Фур'є від частоти (або періоду) називається амплітудним спектром Фур'є; графік фазового кута Фур'є дає фазовий спектр Фур'є. Амплітудний спектр Фур'є коливання ґрунту показує, як розподіляється амплітуда коливання відносно частоти (або періоду). Спектр Фур'є дуже чітко виражає частотний склад коливання.

Хоча рівень і форма амплітудного спектра Фур'є сейсмічного коливання залежать від амплітуд коливань, їх періодів і загальної тривалості впливу, вид цього спектра визначається ще й фазовими зсувами гармонік, і амплітуда спектра прискорень або інших параметрів коливання не може безпосередньо використовуватися для розрахунку сейсмічних навантажень замість їх часових функцій. Тому в проектуванні зазвичай додатково користуються спектром реакції споруд, розглядаючи їх як осцилятори з одним ступенем свободи при даній моді коливань.

2.5.2. Щільність спектра потужності

Амплітудний спектр Фур'є показує, як амплітуда коливання залежить від частоти. Ця інформація також може бути виражена в одиницях потужності.

У більшості випадків в інженерних цілях необхідне лише абсолютне значення амплітуди Фур'є, а не те, чи є вона частиною синусоїдального або косунусоїдального ряду. Це пов'язано з тим, що абсолютне значення забезпечує загальний обсяг інформації, що міститься із заданою частотою. Оскільки квадрат абсолютного значення вважається потужністю сигналу, а не спектром Фур'є, коливання можуть бути виражені в термінах потужності $P(\omega_n)$, яка визначається як:

$$|P(\omega_n)| = \frac{1}{2}(a_n^2 + b_n^2) = \frac{1}{2}c_n^2$$

Це визначення потужності може застосовуватися до будь-якого сигналу (воно не пов'язане з множенням механічної сили на швидкість-потужність). Для отримання спектра потужності можна побудувати графік залежності

потужності від частоти. Повна потужність сигналу однаково не залежить від того, розраховується вона в часовій або частотній області:

$$totalpower = \sum_{n=1}^{\infty} P(\omega_n) = \int_0^{T_f} [x(t)]^2 dt = \frac{1}{2} \int_0^{\omega_n} c_n^2 d\omega .$$

2.6. Спектри реакцій (відгуків) одиничних осциляторів

Для виконання сейсмічного аналізу та проектування конструкцій на конкретному майданчику необхідно мати запис землетрусу в часі. Однак неможливо отримати реальні записи для кожного досліджуваного будівельного майданчика. Крім того для виконання сейсмічного аналізу конструкції є недостатнім лише значення пікового прискорення ґрунту, оскільки реакція конструкції залежить від частотного складу коливань ґрунту та його динамічних властивостей. Тому для проведення коректного сейсмічного аналізу конструкцій популярним інструментом є спектр реакції на землетрус.

Спектр реакції є найбільш корисним показником потенціалу небезпеки землетрусу для інженерів. Спектр реакції (відповіді, відгуку) - це діаграма, яка відображає максимальну реакцію осцилятора з одним ступенем свободи на конкретний землетрус. Змінюючи частоту (або період) та коефіцієнт згасання системи, можна оцінити максимальні величини реакції конструкції з точки зору максимального прискорення, швидкості або переміщення системи.

Рівняння руху $y(t)$ лінійного осцилятора з одним ступенем свободи і згасанням ξ при коливанні основи виражається співвідношенням:

$$\ddot{y}(t) + 2\omega_i \xi \dot{y}(t) + \omega_i^2 y(t) = -x(t) , \quad (2.6)$$

де ω_i – частота власних коливань незагасаючого осцилятора. Відносне зміщення такого осцилятора y може бути записано у вигляді:

$$y = \frac{1}{\omega_i (1 - \xi^2)^{1/2}} \int_0^t x(\tau) e^{-\omega_i \xi (t-\tau)} \sin \omega (1 - \xi^2)^{1/2} (t - \tau) d\tau . \quad (2.7)$$

Відносна швидкість

$$\dot{y} = -\int_0^t \ddot{x}(\tau) e^{-\omega_i(t-x)} \cos \omega(1-\xi^2)^{1/2}(t-\tau) d\tau + \frac{\xi}{(1-\xi^2)^{1/2}} \int_x^t \ddot{x}(\tau) e^{-\omega_i \xi(t-x)} \sin \omega(1-\xi^2)^{1/2}(t-\tau) d\tau \quad (2.8)$$

Абсолютне прискорення $(\ddot{y} + \ddot{x})$:

$$(\ddot{y} + \ddot{x}) = \frac{\omega_i(1-\xi)}{(1-\xi^2)^{1/2}} \int_x^t \ddot{x}(\tau) e^{-\omega_i \xi(t-x)} \sin \omega(1-\xi^2)^{1/2}(t-\tau) d\tau + 2\omega\xi \int_x^t \ddot{x}(\tau) e^{-\omega\xi(t-x)} \cos \omega(1-\xi^2)^{1/2}(t-\tau) d\tau \quad (2.9)$$

Спектром реакцій є огинаюча максимальних реакцій осциляторів. При малих величинах згасання ξ член $(1 - \xi^2)^{1/2}$ і вираз для максимального відносного зміщення осцилятора $y=S_D$ можуть бути записані у вигляді (див. рівняння (2.7)):

$$S_D = \left[\int \ddot{x}(\tau) e^{-\omega\xi(t-x)} \sin \omega(1-\xi^2)^{1/2}(t-\tau) d\tau \right]_{\max}$$

Тоді для максимальної відносної швидкості (див. рівняння (2.8)) отримаємо: $S_v = \omega_i S_D$.

Спектри реакції будуються в подвійному логарифмічному масштабі. Вони можуть бути розраховані прямим методом рішення рівняння (2.6) і перерахунком з одного спектра в інший. Наприклад, спектр швидкості, розрахований множенням на ω_i спектра зміщень або діленням на ω спектра прискорень, називається спектром псевдошвидкості. Він відрізняється від визначеного прямим способом спектра тим менше, чим менше згасання. Значення згасання більшості будівельних конструкцій лежать в інтервалі $\xi = 0,02 - 0,2$ [Ньюмарк, Розенблют, 1980; РБ-006-98, 1998]

Спектри реакцій одна з найбільш широко використовуваних концепцій в теорії і практиці розрахунків споруд на сейсмостійкість. Ця концепція запропонована більше 80-ти років тому, і в даний час використовується практично у всіх зарубіжних нормативних документах і довідниках з розрахунку споруд на сейсмостійкість. Концепцію спектрів реакції

використовують країни Європи, країни Азії, Північної та Південної Америки, Австралії і т.д. в нормах з розрахунку на сейсмостійкість будівель, транспортних споруд і атомних станцій.

Очевидно, що максимальне прискорення коливань споруди залежить від його власної частоти і згасання [Dobry, 1998; Вознесенский, 1999]. Для споруди з одним ступенем свободи і власним періодом $T < 5$ с спектральна швидкість S_v пов'язана з відповідним спектральним значенням швидкості S_a рівнянням $S_v = \frac{T}{2\pi} S_a$. Якщо споруда розглядається як система з одним ступенем свободи, його максимальне прискорення, а, отже, і максимальні сили інерції при сейсмічному коливанні можуть бути визначені безпосередньо по спектру реакції, якщо відомий власний період його коливань. Якщо ж споруда рухається як система з декількома ступенями свободи, то параметри його реакції можуть аналогічним чином визначатися для різних мод коливань. Сумарний же ефект оцінюється або як їх комбінація, або до уваги береться тільки перша мода коливань, що має основний вплив на виникаючі горизонтальні сили.

Таким чином, маючи спектр прискорення, що відповідає динамічній моделі будівлі, як узагальненої системи з одним ступенем свободи, можна знайти максимально можливе для цієї моделі сейсмічне навантаження при коливанні її основи за законом спектра акселерограми, прийнятої для розрахунків. Розрахункові спектри будуються шляхом статистичної обробки ансамблю реальних записів коливань ґрунту при сильних землетрусах, і в міру отримання нових записів вони можуть додатково коригуватися. При розрахунку відповідальних промислових об'єктів виникає необхідність в побудові так званих поверхових акселерограми і поверхових спектрів реакції [Бирбраер, 1998; Datta, 2010].

Вперше ідея використання спектрів максимальних реакцій для подання сейсмічних впливів була викладена в 1926 році в статті К. А. Сюехіро [Suehiro, 1926]. Його аналізатор сейсмічних коливань (рис. 2.4) складався з 13-

ти осциляторів (різних мас, підвішених на пружинах) з різними власними частотами, що змінюються в діапазоні від 0,55 до 4,5 Гц (або періодами в діапазоні від 0,22 до 1,81 сек).

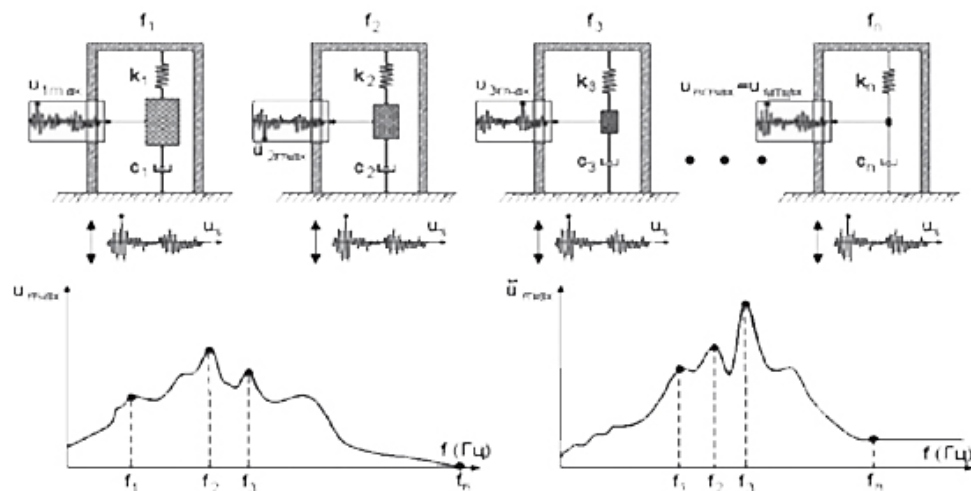


Рис. 2.4 Прилад Суехіро для експериментальної побудови спектрів реакції

Під час землетрусів коливання мас записувалися на барабани, що обертаються, фіксуючи їх реакцію на реальне сейсмічне навантаження. На кожній діаграмі вибиралася тільки одна точка – максимальне переміщення даної маси, яка наносилася на графік, де по горизонтальній осі відкладалися частоти (періоди) коливань осциляторів, а по вертикальній - максимальні значення переміщень мас при даному сейсмічному навантаженні. Основи математичної теорії спектрів реакції були викладені в докторській дисертації Біо, виконаної під керівництвом Теодора фон Кармана. Він використовував розкладання коливання зсувної балки по власним формам, якою він моделював будівлю для визначення реакції будівлі на довільні коливання ґрунту. Крім того, він запропонував розділити проблеми на дві частини, аналізуючи окремо пружні властивості будівлі і частотний спектр землетрусів, представляючи сейсмічне навантаження інтегралом Фур'є. В результаті з'явилася можливість визначити внесок кожної власної форми в термінах амплітудного спектра Фур'є. Ці дослідження представлені в статтях [Beniof, 1934; Biot, 1933; Biot, 1941].

Хауснер використовував запропоновану Біо концепцію спектрів реакції. В 1959 році він розробив перший інженерний діапазон сейсмічних розрахунків [Housner, 1959; Housner, 1970], названий розрахунковим спектром Хауснера, шляхом усереднення і згладжування спектрів реакції восьми модифікацій коливань ґрунту, тобто зареєстрованих двох горизонтальних складових коливань ґрунту під час землетрусів 1934 і 1940 років в Ель-Сентро, землетрусу 1949 року в Олімпії та землетрусу 1952 року в Тафті. Крім того, спектри реакції восьми рухів ґрунту були прив'язані до пікового прискорення ґрунту (PGA) 0,2 g. Для розрахункових спектрів реакції, які відповідали іншим піковим прискоренням ґрунту, потрібно помножити початковий розрахунковий спектр реакції на частку необхідного пікового прискорення ґрунту до 0,2 g.

В розрахунковому спектрі Хауснера для кількісної оцінки потенційних збитків від землетрусів використовується лише пікове прискорення ґрунту. Однак слід зауважити, що на досить високих частотах спектральні прискорення спектра реакції близькі до PGA, а на інших частотах спектральні прискорення сильно відрізняються від PGA. Таким чином, використання фіксованої спектральної форми і її масштабування за допомогою одного параметра, тобто PGA, концептуально не виправдано; слід враховувати зміну форми спектра через деякі інші фактори, такі як магнітуди землетрусів, відстані від джерела до майданчика і місцеві ґрунтові умови.

Протягом 1970-х років Комісія з атомної енергії (Atomic Energy Commission) США профінансувала два дослідження: перше проведене Джоном А. Блюмом та іншими співробітниками [Blume et al., 1973]; друге проведене компанією NM Newmark Consulting Engineering Services [Newmark et al., 1973a,b], по розробці проектних спектрів реакції для атомних електростанцій. Дослідницька група Блюма використала статистичний аналіз 31 запису сейсмічних коливань ґрунту і розрахували спектри реакції на ці сейсмічні коливання. Використовуючи набір коефіцієнтів підсилення, які відповідають чотирьом домінантним частотам, Блюм рекомендував горизонтальний і вертикальний проектні спектри реакції з ймовірністю не перевищення 84,1%

для ядерної промисловості. Ці розрахункові спектри реакції використовуються в стандарті Комісії з ядерного регулювання США - R.G. 1.60 [USNRC, 2014] для сейсмостійкого проектування ядерних споруд. Дослідницька група Ньюмарка помітила, що деякі спектральні ординати більше чутливі до пікової швидкості ґрунту (PGV) або пікового зміщення ґрунту (PGD), ніж до PGA. Тобто для спектра реакції виділено три чутливі області: височастотний діапазон є чутливим до прискорень, проміжний діапазон - до швидкості, а низькочастотний чутливий до зміщень. Застосовуючи коефіцієнти підсилення спектра в різних чутливих діапазонах для різних коефіцієнтів згасання, Ньюмарк і Холл [Hall, Mohraz, and Newmark, 1976; Newmark and Hall, 1982] запропонували згладжений пружний розрахунковий спектр реакції, тобто розрахунковий спектр Ньюмарка, який широко використовувався і використовується у багатьох будівельних стандартах, таких як ASCE 4-98 [ASCE, 2000], DOE-STD-1023-2002 [DOE, 2002] і CSA N289.3-10 [CSA, 2010]. Дослідження викладене в роботі [Newmark et al., 1973a] дало результати, що спектри реакції конструкцій, рекомендовані дослідницькою групою Блюма і дослідницькою групою Ньюмарка, в значній мірі збігаються.

Для побудови проектного спектра Ньюмарка необхідні коефіцієнти підсилення спектра і параметри руху ґрунту (наприклад, PGA, PGV і PGD). У [Newmark et al., 1973b] - 28 горизонтальних і 14 вертикальних рухів ґрунту використовувалися для визначення імовірнісних розподілів коефіцієнтів підсилення горизонтального і вертикального спектра відповідно. Для ділянок, на яких відсутня інформація про PGA, PGV і PGD, були рекомендовані відношення між цими трьома параметрами коливань ґрунту [Hall, 1982; Newmark and Hall, 1982]: $V/a = 1,2$ (м/с)/g для ділянок складених осадовими відкладами, $V/a = 0,91$ (м/с)/g для ділянок, складених скельними ґрунтами та $ad/V^2=6,0$ для всіх типів ділянок, де a , V і d – PGA, PGV і PGD відповідно. У розрахунковому спектрі Ньюмарка спектральне прискорення – коефіцієнт підсилення α_A , спектральна швидкість – коефіцієнт підсилення α_V і коефіцієнт підсилення зміщення - α_D характеризують спектральну амплітуду в діапазоні

високих частот, в діапазоні проміжних частот і в діапазоні низьких частот, відповідно. Співвідношення між параметрами руху ґрунту в основному характеризують форму спектра.

Оскільки співвідношення v/a і ad/V^2 , рекомендовані Ньюмарком, не враховують магнітуди землетрусів, а коефіцієнти підсилення спектра не враховують місцеві ґрунтові умови і магнітуди землетрусів, то в результаті виникли проблеми в застосуванні розрахункових спектрів Ньюмарка. В роботах [Dunbar and Charlwood, 1991; Mohraz, 1976; Mohraz, 1978; Mohraz, 1992] вказується, що розрахунковий спектр Ньюмарка показує більш низькі амплітуди на високих частотах і більш високі амплітуди на низьких частотах у порівнянні зі спектрами реакції, які отримані статистичним методом. Для сейсмостійкого проектування необхідні більш точні і реалістичні розрахункові спектри реакції.

Спектр дизайну Хаузнера, спектр реакції в USNRC R.G. 1.60 і розрахунковий спектр Ньюмарка наразі віднесені до спектрів реакції отриманих методами статистичного аналізу певного набору вхідних рухів ґрунту.

2.6.1. Чисельний розв'язок задачі розрахунку спектра реакції

Розглянемо чисельний розв'язок задачі розрахунку спектра реакції. При цьому вирішується диференціальне рівняння сейсмічних коливань системи з одним ступенем свободи $m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{y}_0$, або

$$\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2y = -\ddot{y}_0(t), \quad (2.10)$$

де m – маса, c - коефіцієнт в'язкого згасання; k - коефіцієнт жорсткості; $\ddot{y}_0(t)$ - прискорення ґрунту основи; $\omega = \sqrt{k/m}$ кругова частота вільних коливань без врахування згасання, $\xi = \frac{c}{c_c} = c/2m\omega$ – відносний коефіцієнт згасання (відношення реального згасання до критичного); $c_c = 2m\omega$ - мінімальна величина згасання, при якій переміщення прагне до нуля по експоненті і не відбуваються

вільні коливання (критичне згасання). Залежність між параметром в'язкого згасання і логарифмічним декрементом виражається формулою $\xi \approx \delta/2\pi$.

Рішення рівняння (2.10), представлене у вигляді інтеграла Дюамеля [Назаров, 1959; Клаф, Пензиен, 1979], при нульових початкових умовах і $\omega_1 = \omega\sqrt{1 - \xi^2} \approx \omega$ записується як:

$$y(t) = -\frac{1}{\omega} \int_{\tau=0}^t \ddot{y}_0(\tau) \exp[-\omega\xi(t-\tau)] \sin \omega(t-\tau) d\tau = , \quad (2.11)$$

$$= -[a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t]$$

$$\text{де } a(\omega) = -\frac{1}{\omega} \int_{\tau=0}^t \ddot{y}_0(\tau) \exp[-\omega\xi(t-\tau)] \cos \omega t d\tau ,$$

$$b(\omega) = -\frac{1}{\omega} \int_{\tau=0}^t \ddot{y}_0(\tau) \exp[-\omega\xi(t-\tau)] \sin \omega t d\tau .$$

Диференціюванням (2.10) визначається швидкість руху маси відносно основи

$$\dot{y}(t) = -\omega[a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] -$$

$$- \xi\omega[a(t) \sin \omega_1 t - b(t) \cos \omega_1 t] = \quad (2.12)$$

$$= -\int_0^t \ddot{y}_0(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \cos \omega_1(t-\tau) d\tau + \xi\omega y(t)$$

З рівняння руху $\ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y = 0$, де $\ddot{y}_1 = \ddot{y} + \ddot{y}_0$, можна отримати повне прискорення маси m відносно нерухомої системи відліку

$$\ddot{y}(t) = -\omega^2 y(t) - 2\xi\omega\dot{y} = \omega^2(1 + 2\xi^2)[a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] +$$

$$+ 2\xi\omega^2[a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] . \quad (2.13)$$

Спектри максимальних відносних переміщень, швидкостей і прискорень маси системи з одним ступенем свободи, отримані з (2.11) - (2.13), відповідно записуються:

$$D(\xi, \omega) = \left| [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \right|_{\max_t} , \quad (2.14)$$

$$V(\xi, \omega) = \left| \omega[a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] + \xi\omega[a(t) \sin \omega_1 t - b(t) \cos \omega_1 t] \right|_{\max_t} , \quad (2.15)$$

$$A(\xi, \omega) = \left| \begin{array}{l} \omega^2(1 - 2\xi^2)[a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] + \\ + \xi\omega^2[a(t) \cos \omega t - b(t) \sin \omega t] \end{array} \right|_{\max_t} , \quad (2.16)$$

де «max» означає максимальне значення для модуля функції на всьому часовому інтервалі, інтеграли $a(\omega)$, $b(\omega)$ обчислюються методами чисельного інтегрування. При використанні формули Сімпсона [Демидович, 1970; Chopra, 2012], інтеграли $a(\omega)$ і $b(\omega)$ зводяться до наступних рівнянь:

$$a(\omega) = \sum (t - 2\Delta\tau) + \frac{\Delta\tau}{6} \left[\begin{array}{l} \ddot{y}_0(t - 2\Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - 2\Delta\tau)] \cdot \cos \omega(t - 2\Delta\tau) + \\ + 4\ddot{y}_0(t - \Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - \Delta\tau)] \cdot \cos \omega(t - \Delta\tau) + \\ + \ddot{y}_0(t) \cdot \exp(-\xi\omega t) \cos \omega(t) \end{array} \right], \quad (2.17)$$

$$b(\omega) = \sum (t - 2\Delta\tau) + \frac{\Delta\tau}{6} \left[\begin{array}{l} \ddot{y}_0(t - 2\Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - 2\Delta\tau)] \cdot \sin \omega(t - 2\Delta\tau) + \\ + 4\ddot{y}_0(t - \Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - \Delta\tau)] \cdot \sin \omega(t - \Delta\tau) + \\ + \ddot{y}_0(t) \cdot \exp(-\xi\omega t) \cdot \sin \omega(t) \end{array} \right], \quad (2.18)$$

де $\sum(t - 2\Delta\tau)$ - результат сумування для попереднього інтервалу часу $t - 2\Delta\tau$ - крок інтегрування. Тут $a(\omega)$ і $b(\omega)$ послідовно обчислюються в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n з інтервалом $2\Delta\tau$, потім по (2.14) - (2.16) можемо побудувати спектральні криві переміщень, швидкостей і прискорень на сейсмічне навантаження. В практиці інженерної сейсмології переважно використовуються спектри псевдошвидкості і псевдоприскорень, що визначаються формулами:

$$\tilde{V}(\xi, \omega) = \omega D(\xi, \omega) = \left| \omega [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \right|_{\max}, \quad (2.19)$$

$$\tilde{A}(\xi, \omega) = \omega^2 D(\xi, \omega) = \left| \omega^2 [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \right|_{\max}, \quad (2.20)$$

Таким чином, спектри реакції характеризують поведінку реальної системи з одним ступенем свободи з певним періодом і згасанням і визначають значення реакції цієї системи на сейсмічні навантаження.

2.6.2. Методика Ньюмарка-Холла використання спектрів максимальних реакцій на землетрус

Концепція спектрів максимальних реакцій на сейсмічні навантаження використовується практично у всіх нормативних документах різних країн. Найбільш широкого застосування набула методика, розроблена вченими Ньюмарка і Холлом [Newmark, 1975]. В основі цієї методики ординати

горизонтальних розрахункових спектрів реакції одиничних осциляторів (S_a спектра реакції прискорення, S_v спектра реакції швидкості та S_d спектра реакції переміщень) отримуються шляхом множення пікових показників коливання ґрунту, що визначаються такими параметрами, як пікове прискорення a , пікова швидкість v і пікове переміщення d , на коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань, представлених в таблиці 2.1. Таблиця значень коефіцієнтів підсилення була опублікована в 1982 році Ньюмарком і Холлом в статті «Earthquake Spectra and Design», в дослідженнях інституту «Earthquake Engineering Research Institute» (Берклі, Каліфорнія).

Саме ці коефіцієнти в чинних будівельних нормах [Будівництво..., 2014; РСН 65-87; РСН 60-86] називаються коефіцієнтами динамічності [Курбацкий, 2019].

Коефіцієнти підсилення коливань: a_a , a_v і a_d для трьох областей спектра були отримані в результаті обробки великого набору акселерограм, записаних на різних типах ґрунтів.

Таблиця 2.1

Коефіцієнти Ньюмарка-Холла підсилення сейсмічних коливань

Загасання, % від критичного	84,1%			50%		
	a_a	a_v	a_d	a_a	a_v	a_d
0,05	5,1	3,84	3,04	3,68	2,59	2,01
1	4,38	3,38	2,73	3,21	2,31	1,82
2	3,66	2,92	2,42	2,74	2,03	1,63
3	3,24	2,64	2,24	2,46	1,86	1,52
5	2,71	2,30	2,01	2,12	1,65	1,39
7	2,36	2,08	1,85	1,89	1,51	1,29
10	1,99	1,84	1,69	1,64	1,37	1,20
20	1,26	1,37	1,39	1,17	1,08	1,01

При визначенні пікових значень коливань ґрунту для будівельних майданчиків складених відносно жорсткими ґрунтами, та які можуть піддаватись впливам від землетрусів зі значеннями магнітуд від 6,5 до 7,0, прийнятними є відношення: $V/a = 1,2 \text{ m/s/g}$ для осадових відкладів і $V/a = 0,91 \text{ m/s/g}$ для скельних основ, максимальні переміщення визначаються з рівності $ad/V^2=6$. Ці співвідношення були отримані в результаті статистичної обробки великої кількості акселерограм реальних землетрусів [Newmark, 1975]. Ці співвідношення вважаються добре обґрунтованими і надійними, тому використовуються в нормах з розрахунку атомних станцій [Seismic Analysis..., 2017].

Якщо значення магнітуд землетрусів, впливам від яких піддається досліджувана територія, не лежать в цій області, рекомендується виконати спеціальні розрахунки для визначення точніших відношень V/a і ad/V^2 або розрахувати спеціальний для даного будівельного майданчика спектр.

Методика побудови спектрів реакцій детально описується в монографії [Suehiro, 1926]. Розглянемо короткий алгоритм побудови спектрів реакцій. Припустимо, що відоме пікове прискорення коливань ґрунту \ddot{u}_g . Використовуючи співвідношення Ньюмарка, отримаємо пікові швидкості і пікові зміщення ґрунту: \dot{u}_g и u_g . Побудуємо графік пікових параметрів коливань ґрунту (чорна лінія на рис. 2.5). Використовуючи коефіцієнти підсилення для заданого коефіцієнта згасання, побудуємо відрізки прямих для трьох областей спектра реакцій: синя, червона і зелена лінія.

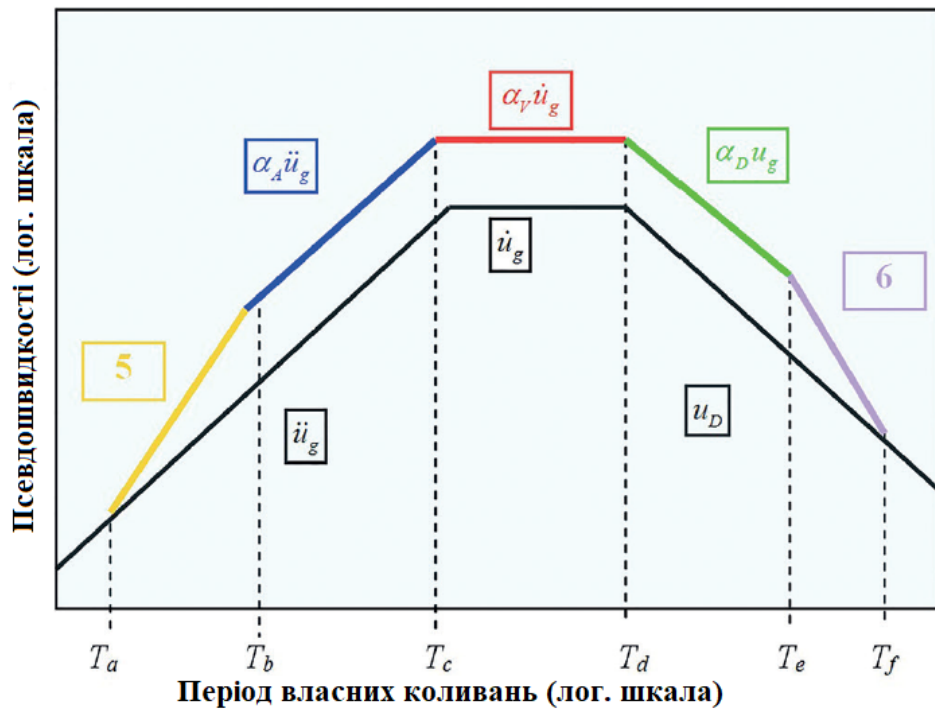


Рис. 2.5 Спектр реакції Ньюмарка-Холла

Значення фіксованих параметрів T_a , T_b , T_e і T_f були отримані в результаті обробки спектрів великої кількості землетрусів для різних ґрунтових умов (скельних ґрунтів, м'яких ґрунтів і т.д.).

Проведемо з'єднувальні лінії між точками з координатами від T_a до T_b і від T_e до T_f .

Відзначимо, що значення періодів T_a , T_b , T_e і T_f мають фіксовані значення: $T_a = 1/33$ сек, $T_b = 1/8$ сек, $T_e = 10$ сек і $T_f = 33$ сек. Періоди T_c і T_d визначаються точками перетину констант $A = \alpha_A \ddot{u}_g$, $V = \alpha_V \dot{u}_g$ і $D = \alpha_D u_g$, так як параметри α_A , α_V і α_D залежать від згасання.

Якщо перейти від логарифмічних до звичайних арифметичних координат, тоді спектр реакцій набуде вигляду, який зазвичай використовується в нормативних документах. На рис.2.5 представлений графік спектрів реакцій, прийнятих в єврокодах.

На спектрах реакцій, представлених в залежності від періодів коливань досліджуваних споруд, що піддаються впливові реальних землетрусів, чітко виділяються чотири характерні точки: при $T_0 = 0$, $T = T_b$, $T = T_c$ і $T = T_d$. Ці

точки отримані в результаті обробки великої кількості акселерограм землетрусів. Походження цих характерних точок визначаються на три-ординатних графіках спектрів реакцій прискорень, швидкостей і переміщень, побудованих в логарифмічних координатах.

2.6.3. Власне згасання спектрів реакції

У випадку коли конструкція є жорсткою з низьким власним періодом коливання менше 0,5 с, вона є більш чутливою до прискорення, ніж зміщення, і структура має тенденцію рухатися з тією ж амплітудою прискорення, що і ґрунтова основа. В'язке згасання при цьому мало впливає на реакцію структури. Коли конструкція є гнучкою з досить високим періодом коливань, структурні маси, як правило, залишаються нерухожими і не створюють значних навантажень. Хоча в'язке згасання мало впливає на реакцію структури, однак, коли власний період структури знаходиться за межами дуже високих і дуже низьких значень, тобто в чутливій до швидкості області, тоді згасання має найбільші ефекти. Крім того, якщо власний період коливання споруди є близьким до переважаючого періоду коливання ґрунту при землетрусі, енергія ефективно передається в конструкцію, а структурні реакції підсилюються, що призводить до резонансу або стану, близького до резонансу. Однак у цьому стані в'язке згасання в структурі ефективно поглинатиме енергію структурної реакції та розсіюватиме її, тим самим пом'якшуючи накопичення резонансних реакцій та зменшуючи амплітуди реакції. Також зазначається [Kramer, 1996], що ефекти поглинання більші при малих, ніж при високих значеннях власного згасання, тобто коли коефіцієнт згасання збільшується з 0 до 5%, зменшення реакції набагато значніше, ніж за рахунок збільшення поглинання з 15 до 30%. Оскільки поглинання для більшості конструкцій низьке, можна зрозуміти, що для зменшення динамічної реакції можна або збільшити власне поглинання, додавши, наприклад, демпфери, або збільшити природний період конструкцій, використовуючи, наприклад, основу системи ізоляції, яка розглядається в роботі [Jia, 2017]. Спектри проектної реакції в проектних кодах, як правило,

наводяться на основі властивого поглинання системи 5%. Якщо для інших коефіцієнтів поглинання потрібні спектральні значення, тоді спектральні прискорення можна регулювати за допомогою масштабного коефіцієнта (коефіцієнта корекції). Наприклад, за формулою Norsok [NORSOK, 2004] та ISO 19901-2 [ISO19901-2, 2004], із згасанням ξ в % (ξ має бути від 2 до 10%), η можна обчислити як:

$$\eta = -\ln(\xi / 100) / \ln(20)$$

За NORSAR [NORSAR,1998]:

$$\eta = 1,48 - 0,3 \ln(\xi)$$

За Eurocode 8 [Eurocode 8, 2004]:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0,55$$

Висновки до Розділу 2.

Розглянуто широкий спектр параметрів сейсмічних коливань ґрунту і їх використання в інженерних цілях геофізичного забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд. Деякі з розглянутих параметрів описують лише амплітуду коливань ґрунту, інші частотний склад, тривалість або параметри, на які впливають дві-три характеристики сейсмічних коливань. Коливання ґрунту з високими піковими прискореннями традиційно вважаються більш руйнівними, ніж коливання з меншими піковими прискореннями. В розділі обґрунтовується, що коливання з високими піковими прискореннями, не можуть нанести значної шкоди багатьом типам конструкцій, якщо вони тривають дуже короткий проміжок часу або відповідають частотам за межами частотного діапазону власних коливань споруди. Тому необхідно комплексно оцінювати потенціал небезпеки сейсмічних коливань в основі будівлі і визначати як амплітудний так і спектральний склад коливань. Переважаючий період або частота коливання, визначений по амплітудним спектрам Фур'є є грубим наближенням до опису частотного складу коливання, оскільки однакове значення може спостерігатись в спектрах Фур'є з кардинально різним частотним складом.

Приведено обґрунтування, що пікове прискорення є корисним параметром, але не надає інформації про частотний склад або тривалість коливання; тому обов'язково повинно бути доповненим додатковою інформацією для точної характеристики коливання ґрунту.

Приведено чисельний розв'язок задачі розрахунку спектра реакції одиничних осциляторів. Проаналізовано використання концепції спектрів максимальних реакцій на сейсмічні навантаження у нормативних документах різних країн. Приведено алгоритм побудови спектрів реакцій.

Аналіз сейсмічної небезпеки та розробка проектних (прогнозних) сейсмічних коливань ґрунту значною мірою опираються на описові характеристики і параметри сейсмічних коливань. Описати сейсмічне коливання одним параметром може бути доречним лише в одиничних випадках. Для адекватного опису важливих характеристик конкретного

сейсмічного коливання зазвичай потрібно кілька параметрів. Оскільки на різні технічні проблеми впливають різні характеристики коливання ґрунту, значимість різних параметрів залежить від поставлених задач, для яких вони використовуються.

Перелік використаних джерел до Розділу 2

1. Abrahamson N. A., Litehiser J. J. (1989). "Attenuation of vertical peak acceleration," Bulletin of the Seismological Society of America, 79, 549–580.
2. ASCE (2000). Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary, Standard ASCE 4-98. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
3. Beniof H. (1934). The Physical Evaluation of Seismic Destructiveness // Bulletin of the Seismological Society of America, 24 (4), 398-403.
4. Biot V. A. (1933). Theory of Elastic System Vibration under Transient Impulse with Application to Earthquake-Proof Buildings / Proceeding of the National Academy of Science. – U.S.A., 1933 – № 19 (2).
5. Biot M.A. (1941). General Theory of Three-Dimensional Consolidation. Journal of Applied Physics, 12, 155-164.
6. Blume J. A., Sharpe R. L., Dalal J. S. (1973). Recommendations for Shape of Earthquake Response Spectra, Wash-1254. U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C.
7. Bolt B. A. (1969). "Duration of strong motion," Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, pp. 1304-1315.
8. Campbell K. W. (1985). Strong ground motions attenuation relations: A ten-year perspective, Earthquake Spectra, 1, 4, 759-804.
9. Chopra A. K. (2012). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4th Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 994.

10. CSA (2010). Design Procedures for Seismic Qualification of Nuclear Power Plants, Standard CSA-N289.3-10. Canadian Standard Association (CSA), Mississauga, Ontario.
11. Datta T. K. (2010). Seismic Analysis of Structures. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 464 p.
12. Dobry R. (1998). "Earthquake horizontal response spectra for different site conditions in New York City", Clifton Park, NY, Report for Weidlinger Associates, June 19, 1998.
13. DOE (2002). Natural Phenomena Hazards Assessment Criteria, Standard DOE-STD-1023-2002. U.S. Department of Energy, Washington D.C.
14. Dunbar W. S., Charlwood R. G. (1991). Empirical methods for the prediction of response spectra. *Earthquake Spectra*, 7(3), 333–353.
15. Eurocode 8 (2004). Design of structures for earthquake resistance—Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings.
16. Hall W. J., Mohraz B., Newmark N. M. (1976). Statistical Studies of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra, NUREG-0003. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Urbana, Illinois.
17. Hanks T.C., McGuire R.K. (1981). "The character of high-frequency strong ground motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, pp. 2071-2095.
18. ISO19901-2 (2004). Petroleum and natural gas industries-specific requirements for offshore structures-Part 2: seismic design procedures and criteria, 1st ed.
19. Jia J. (2017). Modern earthquake engineering. Offshore and Land-based Structures. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 848 p. DOI:10.1007/978-3-642-31854-2
20. Joyner W. B., Boore D.M. (1988). "Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion," in *Earthquake Engineering and Soil Dynamics 11- Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, New York, 43-102.

21. Kramer S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
22. Krinitzky E. L., Chang F. K. (1987). "Parameters for specifying intensity-related earthquake ground motions," Miscellaneous Paper S-73-1, Report 25, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 43.
23. McCann M. W., Shah H. C. (1979). "Determining strong motion duration of earthquakes," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69, 4, 1253-1265.
24. Mohraz B. (1978). Comments on earthquake response spectra. *Nuclear Engineering and Design*, 45(2), 489–495.
25. Mohraz B. (1992). Recent studies of earthquake ground motion and amplification. In *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, volume 11, 6695–704.
26. Mohraz B. (1976). A study of earthquake response spectra for different geological conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(3), 915–935.
27. Murphy J. R., O'brien L.J. (1977). The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67, 877-915.
28. Newmark N. M., Blume, J. A., Kapur, K. K. (1973a). Seismic design spectra for nuclear power plants. *Journal of the Power Division*, 99(2), 287–303.
29. Newmark N. M., Hall W. J., Mohraz B. (1973b). *A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra*. U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C.
30. Newmark N.M. (1975). Seismic design criteria for structures and facilities Trans-Alaska pipeline system. *Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Earth. Engrg. Inst., 94-103.
31. Newmark N.M., Hall W.J. (1982). *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 103.

32. NORSAR and NGI (1998). Seismic Zonation for Norway, report prepared for the Norwegian Council for Building Standardization (NBR), Oslo, Norway, 190 pp
33. NORSOK Standard N-003 (2004). Actions and action effects, Rev. 2, October 2004
34. NS-G-2.13 «Оценка сейсмической опасности существующих ядерных установок». Руководство по безопасности. Серия норм по безопасности. МАГАТЭ, Вена, 2014.
35. Perez V. (1974). "Time dependent spectral analysis of thirty-one strong motion earthquake records," Open File Report 74-48, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
36. Sawada S., Kishimoto T. (2001). Approximation of natural period of ground based on reflectiontransmission factor method. In: Proceedings of the 36th Japan national conference on geotechnical engineering, pp 2383–2384 (in Japanese)
37. Seed H. B., Mori K., Chan C. K. (1975). "Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands, " Report EERC 75-25, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 21 p.
38. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures «ASCE standard ASCE/SEI 4-16» (2017). American Society of Civil Engineers.
39. SSG-25, МАГАТЭ, Вена (2014). Серия норм МАГАТЭ по безопасности. «Периодическое рассмотрение безопасности атомных электростанций». Специальное руководство по безопасности. МАГАТЭ, Вена, 2014.
40. Suyehiro K. (1926). A Seismic Vibration Analyser and the Records Obtained Therewit // Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo, 1, 59–64.
41. Trifunac M. D., Brady A. G. (1975a). "On the correlation of seismic intensity with peaks of recorded strong ground motion," Bulletin of the Seismological Society of America, 65, 139-162.

42. Trifunac M. D., Brady A. G. (1975b). "A study of the duration of strong earthquake ground motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65, 581-626.
43. Trifunac M.D., Westermo B. (1977). "A note on the correlation of frequency-dependent duration of strong earthquake ground motion with the MMI and geologic condition at the recording stations," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67, 3, 917-927.
44. USNRC (2014). *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Standard NUREG R.G. 1.60 (Revision 2)*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C.
45. Vanmarcke R. H., Lai S. P. (1977). "Strong motion duration of earthquakes," Report R77-16, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
46. Vanmarcke E., Lai Sh. (1980). Strong motion duration and RMS amplitude of earthquake records // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 70, 4, 1293 - 1307.
47. Yoshida N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis; Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Series, Volume 36*, Springer: Dordrecht, The Netherlands. 365. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.
48. Алешин А.С. (2018). О грунтовых коэффициентах. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2, 6-13
49. Бат Маркус (1980). *Спектральный анализ в геофизике*. – Москва: Недра, 535 с.
50. Берзон И. С., Епинаньева А. М., Парийская Г. Н., Стародубовская С. П. (1962). *Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах*. Москва: Изд-во АН СССР, 507 с.
51. Бирбраер А.Н. (1998). *Расчет конструкций на сейсмостойкость*. СПб.: Наука, 255 с.
52. Будівництво в сейсмічних районах України ДБН В.1.1-12:2014. (2014). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 110 с.

53. Вознесенский Е. А. (1999). Динамическая неустойчивость грунтов. Москва: УРСС Эдиториал, 263 с.
54. Демидович Б.П., Марон И.А. (1970). Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 664 с.
55. Клаф Р., Пензиен Дж. (1979). Динамика сооружений. Москва: Стройиздат, 320 с.
56. Курбацкий Е.Н., Мондрус В.Л. (2019). Динамические коэффициенты или спектры реакций (ответов) сооружений на сейсмические воздействия / Academia. Архитектура и строительство, 1, 107–114.
57. Назаров А.Г. (1959). Метод инженерного анализа сейсмических сил. – Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 286 с.
58. Ньюмарк Н., Розенблют Э. (1980). Основы сейсмоактивного строительства. М.: Стройиздат, 61 - 99.
59. РБ-006-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. (1988). Москва: Госатомнадзор России. 63 с.
60. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. (1986). Москва: Госстрой РСФСР, 17 с.
61. РСН 65-87 «Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. (1988). Москва: Госстрой РСФСР, 14 с.
62. Саваренский Е.Ф. (1972). Сейсмические волны. Москва: Недра, 294 с.
63. Харкевич А.А. (1962). Спектры и анализ. Москва: Физматгиз, 234 с.

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ СЕЙСМІЧНОЇ РЕАКЦІЇ ҐРУНТУ

Аналіз сейсмічної реакції ґрунту - одна з найважливіших та відповідальних задач інженерної сейсмології, яка спрямована на прогнозування сейсмічних коливань ґрунту та зміни напружено-деформованого стану кожного шару ґрунтового розрізу. Коливання ґрунту під час землетрусів є нестационарними як по амплітуді, так і по частоті. Процеси, що регулюють реакцію та нестабільність ґрунту є нелінійними і залежать від нестационарності коливань ґрунту. Для побудови сейсмостійкого проєкту конструкції необхідно мати реалістичні і якомога точніші кількісні параметри сейсмічних коливань ґрунту в основі конструкції.

Аналіз сейсмічної реакції ґрунту – це процес розрахунку поширення зсувної хвилі в шаруватій ґрунтовій товщі від корінної породи до вільної поверхні. Задача поширення сейсмічної хвилі вирішується шляхом кількісної оцінки впливу місцевих (локальних) ґрунтових відкладів на трансформацію сейсмічної хвилі. Зазвичай приймається, що типові шари ґрунтової товщі простягаються по горизонталі до нескінченності з плоскою поверхнею, а падаючі хвилі на підшву ґрунтової товщі являють собою просторово однорідні горизонтально поляризовані поперечні хвилі, які поширюються тільки вертикально. Ці припущення пояснюються тим фактом, що властивості ґрунту зазвичай змінюються швидше в вертикальному напрямку, ніж в горизонтальному. Хвилі напружень від вогнища поширюються майже вертикально, коли досягають приповерхневих шарів.

Вище зазначені явища вигину хвилі до вертикалі можуть бути кількісно пояснені за допомогою закону заломлення хвиль Снеліуса: для сейсмічної хвилі, що проходить через середовище з ізотропних шарів, відношення синусів кутів хвиль ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$) відносно нормалі до границі ґрунтового шару (1, 2, ..., n) і швидкості поширення хвиль (v_1, v_2, \dots, v_n) постійні:

$$\sin \theta_1 / v_1 = \sin \theta_2 / v_2 = \dots = \sin \theta_n / v_n = \text{constant}$$

Поблизу вільної поверхні верхні ґрунтові шари зазвичай менш щільні, ніж нижні. Відповідно сейсмічні хвилі поширюються вгору від корінних порід через ґрунтові шари з тенденцією до зменшення швидкості. Отже, якщо ґрунтові шари можна вважати горизонтальними, згідно до наведеного вище рівняння, сейсмічні хвилі, що поширюються вгору від шарів з більш високою швидкістю (жорсткий ґрунт) до шарів з низькою швидкістю (м'який ґрунт), будуть вигинатися / заломлюватися в напрямку вертикальної траєкторії, як показано на рис. 3.1. Таким чином, навіть незважаючи на те, що хвилі всередині жорстких ґрунтових шарів поширюються в трохи нахиленому напрямку, вони поширюються і вигинаються майже вертикально між ґрунтовими шарами і поверхнею Землі за рахунок послідовних заломлень [GovindaRaju et al., 2004]. Враховуючі розглянуті припущення, може бути виконаний одновимірний аналіз поширення хвилі в ґрунтовому середовищі, який заснований або на розв'язку хвильового рівняння, або на моделюванні зосередженої маси. Зазвичай результати дають консервативну оцінку сейсмічної реакції майданчика, при цьому будинки і споруди, спроектовані на основі результатів одновимірного аналізу сейсмічної реакції ґрунтової основи, витримують навантаження під час, навіть, інтенсивних землетрусів.

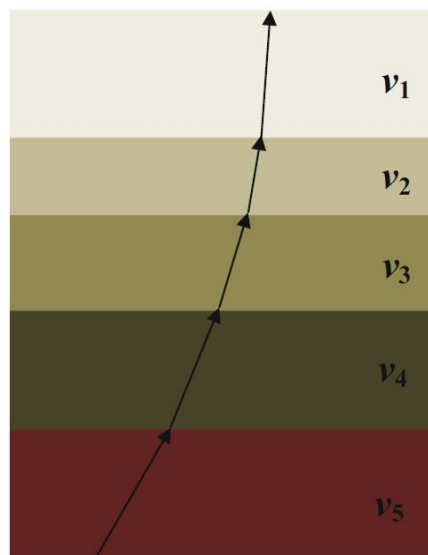


Рис. 3.1 Заломлення SH-хвилі, що поширюється вгору через послідовні ($v_5 > v_4 > v_3 > v_2 > v_1$) шари ґрунтової товщі

Одновимірний аналіз сейсмічної реакції ґрунту виконується з використанням: лінійного, еквівалентного лінійного або нелінійного методів чисельного моделювання [Kramer, 1996]. При використанні лінійного або еквівалентно лінійного методу хвильове рівняння вирішується в частотній області. В нелінійному методі моделювання використовуються нелінійні гістерезисні моделі ґрунту, хвильове рівняння вирішується в часовій області з використанням чисельного інтегрування [Kramer, 1996]. В лінійному методі залежність «напруження-деформація» є лінійною, а в еквівалентному лінійному і нелінійному – гістерезисною, при цьому особливості реакції ґрунту характеризуються формою гістерезисної петлі. Форма гістерезисної петлі визначається законом зменшення модуля зсуву і законом збільшення коефіцієнта поглинання при сейсмічному навантаженні ґрунту. Таким чином, еквівалентний лінійний і нелінійний методи для врахування нелінійності вимагають вибору відповідних кривих динамічних властивостей ґрунту для досліджуваних матеріалів. Оскільки ґрунт проявляє нелінійну поведінку, навіть, при дуже малих деформаціях, тому лінійний метод вже майже не застосовується в аналізі сейсмічної реакції ґрунту. Широко практичного застосування набули еквівалентний ліній та нелінійний методи. Верифікаційні дослідження показали, що обидва методи дають подібні результати при відносно невеликих значеннях амплітуди зсувної деформації ґрунту, що зазвичай відповідає слабким або помірним сейсмічним впливам в випадку. Нелінійний метод може більш точно моделювати реакцію шаруватої товщі, складену м'якими сейсмічно слабкими ґрунтами, які здатні до розрідження при інтенсивних сейсмічних впливах.

3.1. В'язкопружність та поширення сейсмічних хвиль

Базове формулювання лінійної (нескінченно малої) в'язкопружності було розроблене кількома вченими, зокрема Максвеллом (1867), Фойгтом (1892), Лордом Кельвіном (Вільям Томсон (Кельвін, 1875)), Больцманом (1874), Вольтеррою (1909, 1940) і Граффі (1928). Больцман (1874), зокрема, ввів

поняття пам'яті в тому сенсі, що в фіксованій точці середовища напруження в будь-який час залежить від напруження у всі попередні часи [Jose, 2015]. В'язкопружна поведінка - це залежна від часу механічна немоментальна реакція матеріального тіла на зміни прикладеного напруження. На відміну від пружного середовища без втрат, в'язкопружне середовище при коливанні, не буде продовжувати коливатись безкінечно довго. Оскільки реакція не миттєва, існує функція, що залежить від часу, яка характеризує поведінку матеріалу. Ця функція відображає історію напруження або деформації в'язкопружного тіла. Сила залежності стає більшою для подій найближчого минулого і зменшується у міру того, як вони стають більш віддаленими з часом: кажуть, що матеріал має пам'ять. У лінійному в'язкопружному матеріалі напруження лінійно пов'язане з історією деформації до певного часу. Деформація, що виникає внаслідок будь-якого збільшення напруження, буде додаватись до деформації, що виникає внаслідок напружень, раніше створених в тілі. В математичній формі це виражається за допомогою принципу суперпозиції Больцмана або закону Больцмана.

Нехай f і g скалярні функції, що залежать від часу. Часова згортка f та g

визначається як
$$f * g = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau .$$

Закон Гука може бути виражений у трьох або шести вимірному просторі залежно від того, чи є напруження і деформація тензорами матриці. У скорочених матричних позначеннях визначення згортки можна легко розширити, включивши матрицю 6×1 (a) та тензори 6×6 (або матриці) (A):

$$f * a = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)a(t - \tau)d\tau , \quad A * a = \int_{-\infty}^{\infty} A(\tau)a(t - \tau)d\tau .$$

Вважається, що будь-яка функція $f(t)$ є функцією Хевісайда, якщо минула історія f до часу $t = 0$. А саме: $f(t) = \tilde{f}(t)H(t)$, де $H(t)$ - функція Хевісайда

або одинична функція, і на \tilde{f} немає обмежень. Якщо f і g є функціями

$$\text{Хевісайда, можна записати: } f * g = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau.$$

Якщо f є функцією Хевісайда, ми визначаємо операцію Больцмана як

$$f \otimes g = f(0)g + (\partial_t \tilde{f}H) * g, \text{ що відповідає похідній по часу згортки між } f \text{ і } g, \text{ тобто } f * (\partial_t g).$$

3.1.1. Напружено-деформований стан при циклічних навантаженнях

Для будь-якого деформованого стану позначимо через τ і γ відповідно напруження і деформацію для трьохосної деформації, простого зсуву або зсуву при крученні. Припустимо, що до тіла, яке характеризується в'язкопружною реакцією, прикладається повторне дотичне напруження, що змінюється за синусоїдальним законом

$$\tau = \tau_a \sin \omega t, \quad (3.1)$$

де τ_a - амплітуда; t - час; ω - кутова (або кругова) частота.

В результаті прикладення дотичного напруження, рівна йому по частоті зсувна деформація буде спостерігатись з відставанням у часі, яку представимо як

$$\gamma = \gamma_a \sin (\omega t - \delta), \quad (3.2)$$

де γ_a - амплітуда деформації; δ - кут різниці фаз, що показує час відставання деформації від моменту прикладання навантаження.

З рівнянь (3.1) і (3.2) видно, що деформаційна реакція, яка зазвичай виражається як τ/γ , є не тільки функцією відношення амплітуд τ_a/γ_a , але і функцією фазового кута δ .

Для розгляду цієї залежності переважно використовувати метод комплексних змінних. Добре відомо, що напружений і деформований стани, виражені рівняннями (3.1) і (3.2), можна також представити як [Ишихара, 2006]

$$\begin{aligned} \tau_R &= \tau_a \cos \omega t, \\ \gamma_R &= \gamma_a \cos(\omega t - \delta), \end{aligned} \quad (3.3)$$

де τ_R і γ_R – відповідно напруження і деформація, пов'язані з аналогічними параметрами в (3.1) і (3.2).

Таким чином, у в'язкопружному тілі при напруженні τ_R буде розвиватись деформація γ_R . Відповідно, якщо в'язкопружне тіло піддається напруженню, що виражається комплексними змінними $\bar{\tau} = \tau_R + i\tau$, то результуюча деформація прийме вигляд $\bar{\gamma} = \gamma_R + i\gamma$, де i – одиничне уявне число, а $\bar{\tau}$ і $\bar{\gamma}$ – напруження і деформація у вигляді комплексних змінних.

Підставимо рівняння (3.1), (3.2) і (3.3) у вирази напруження і деформації у вигляді комплексних змінних, тоді отримаємо

$$\begin{aligned}\bar{\tau} &= \tau_a e^{i\omega t} \\ \bar{\gamma} &= \gamma_a e^{i(\omega t - \delta)}.\end{aligned}\quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) є загальною формою вираження напружень і деформацій у вигляді комплексних змінних.

При використанні рівнянь (3.3) приймається, що реальна і уявна компоненти вхідного напруження корелюють виключно з реальною і уявною компонентами результуючої деформації. Залежність деформацій і напружень характеризується їх співвідношенням $\bar{\tau}/\bar{\gamma}$, яке можна отримати з рівняння

$$(3.4) \text{ в явному вигляді } \frac{\bar{\tau}}{\bar{\gamma}} = \frac{\tau_a}{\gamma_a} e^{i\delta} = \frac{\tau_a}{\gamma_a} (\cos \delta + i \sin \delta).$$

3.1.2. Поглинання енергії сейсмічних хвиль в'язкопружним ґрунтовим середовищем

3.1.2.1. Дисипація енергії та модель Кельвіна-Фойгта

У реальних ґрунтових середовищах частина пружної енергії хвилі, що поширюється, завжди перетворюється на тепло. Перетворення супроводжується зменшенням амплітуди хвилі. Для відображення розсіювання пружної енергії, в силу математичної зручності, часто використовується в'язке поглинання. Для дослідження поширення в'язкопружних хвиль в ґрунтах,

останні як правило, моделюються як тіло Кельвіна-Фойгта (тобто матеріал, стійкість якого до зсувної деформації складається з пружної та в'язкої частин). Ілюстрація тонкого елемента твердого тіла Кельвіна-Фойгта представлена на рис. 3.2.

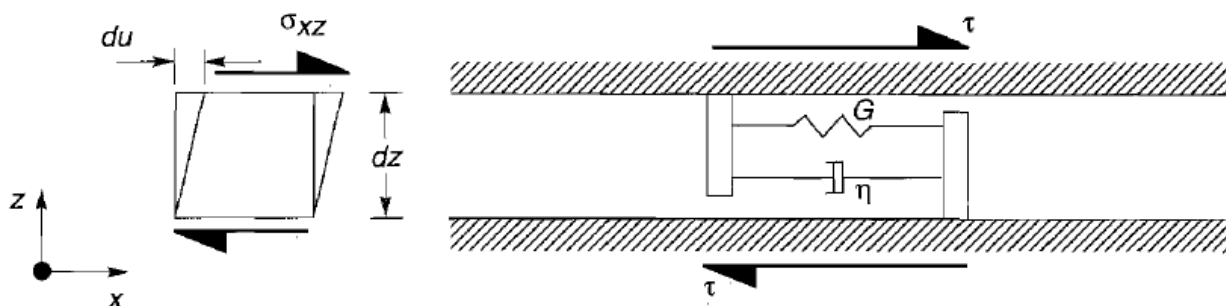


Рис. 3.2 Тонкий елемент твердого тіла Кельвіна-Фойгта, що піддається горизонтальному зсуву. Загальний опір зсувної деформації визначається сумою пружної (пружина) компоненти та в'язкої (демпфер) компонента.

Зв'язок напружень із деформаціями для твердого тіла Кельвіна-Фойгта може бути виражений як

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t}, \quad (3.5)$$

де $\tau (= \sigma_{xz})$ – зсувне напруження, $\gamma (= du/dz)$ – зсувна деформація, а η – в'язкість матеріалу. Таким чином, зсувне напруження - це сума пружної частини (пропорційна деформації) і в'язкої частини (пропорційної швидкості деформації). Гармонійна зсувна деформація може бути виражена, як:

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t, \quad (3.6)$$

зсувне напруження буде:

$$\tau = G\gamma_0 \sin \omega t + \omega \eta \gamma_0 \cos \omega t. \quad (3.7)$$

Разом рівняння (3.5) і (3.6) показують, що петля напруження-деформація твердого тіла Кельвіна-Фойгта є еліптичною. Пружна енергія, що розсіюється за один цикл, визначається площею еліпса, або

$$\Delta W = \int_{t_0}^{t_0 + 2\pi/\omega} \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = \pi \eta \omega \gamma_0^2. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.8) вказує на те, що енергія, яка розсіюється, пропорційна частоті навантаження. Однак в реальних ґрунтах пружна енергія розсіюється за гістерезисним законом рахунок ковзання зерен один відносно один одного. В результаті, їх характеристики розсіювання енергії не чутливі до частоти. Для дискретних систем Кельвіна-Фойгта коефіцієнт поглинання D пов'язаний із петлею сила-зміщення (або, еквівалентно напруження-деформація), як показано на рис. 3.3.

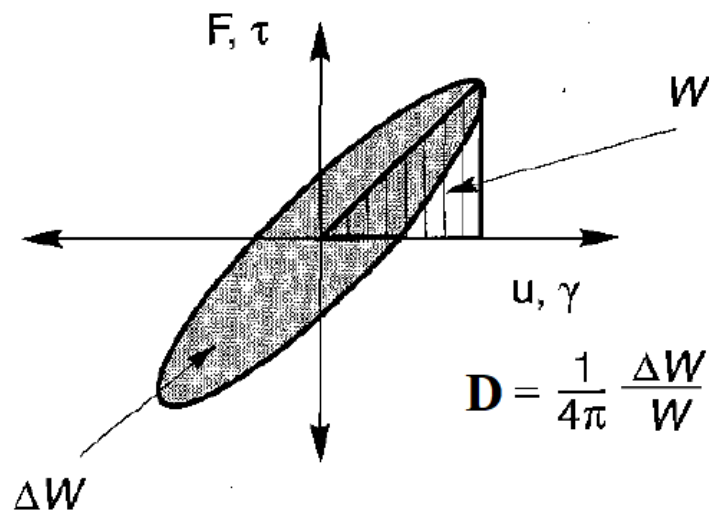


Рис.3.3 Зв'язок між петлею гістерезису та коефіцієнтом поглинання

Оскільки пікова енергія, що зберігається в циклі, становить $W = \frac{1}{2} G \gamma_0^2$,

тоді

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi \eta \omega \gamma_0^2}{\frac{1}{2} G \gamma_0^2} = \frac{\eta \omega}{2G} \quad (3.9)$$

Щоб усунути частотну залежність, зберігаючи зручність в'язкопружного формулювання, рівняння (3.9) часто переформовується для отримання еквівалентної в'язкості, яка обернено пропорційна частоті. Використання цієї еквівалентної в'язкості забезпечує незалежність коефіцієнта поглинання від частоти:

$$\eta = \frac{2G}{\omega} D. \quad (3.10)$$

Тверде тіло Кельвіна-Фойгта, для випадку вертикального поширення SH-хвиль може бути представлено набором нескінченно малих елементів типу, схематично зображеного на рис.3.2. Одновимірне рівняння руху вертикально поширюваних SH-хвиль можна записати як

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}. \quad (3.11)$$

Підставляючи рівняння (3.5) у (3.11) з $\tau = \sigma_{xz}$ і $\gamma = du/dz$ та диференціюючи праву частину, можна записати хвильове рівняння як

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}. \quad (3.12)$$

Для гармонічних хвиль зміщення можна записати як

$$u(z, t) = U(z) e^{i\omega t}, \quad (3.13)$$

які, підставивши у хвильове рівняння (3.12), дає звичайне диференціальне рівняння

$$(G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho\omega^2 U. \quad (3.14)$$

При зондуванні основи сейсмічна хвиля поширюється через шари ґрунту, і кожен шар ґрунту описує зсувні характеристики твердого тіла Кельвіна-Фойгта. Вирішуючи представлене вище хвильове рівняння, можна розрахувати реакцію будь-якого шару ґрунтової товщі або поверхні ґрунтової товщі. Це може бути виконано в часовій або частотній області. У часовій області нелінійність пружин і фаз коливань між кожним шаром може бути врахована явно, але це передбачає великі обчислювальні зусилля [Jia, 2018]. З іншого боку, рішення хвильового рівняння в частотній області вимагає значно менше обчислювальних зусиль, але при умові використання нелінійних характеристик: еквівалентного коефіцієнта поглинання і модуля зсуву, значення яких залежить від амплітуди зсувної деформації.

Рівняння (3.13) можна подати у наступному вигляді:

$$G^* \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho\omega^2 U, \text{ де } G^* = G + i\omega\eta \text{ комплексний модуль зсуву, який}$$

може бути незалежним від частоти. Тоді $G^* = G(1 + i2D)$. Це рівняння руху має наступне рішення:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)}, \text{ де } A \text{ і } B \text{ залежать від граничних умов, а}$$

$$k^* = \sqrt{\rho/G^*} \text{ комплексне хвильове число.}$$

Можна показати згідно [Kolsky, 1963], що k^* задається, як $k^* = k_1 + ik_2$, де

$$k_1^2 = \frac{\rho\omega^2}{2G(1+4D^2)}(\sqrt{1+4D^2} + 1), \quad k_2^2 = \frac{\rho\omega^2}{2G(1+4D^2)}(\sqrt{1+4D^2} - 1).$$

При цьому, лише позитивний корінь k_1 та негативний корінь k_2 мають фізичний зміст. Зауважимо, що для нев'язкого випадку ($\eta = D = 0$) $k_2 = 0$ а $k_1 = k$. Для хвилі, що поширюється в позитивному z -напрямку, рішення можна записати як $u(z, t) = Ae^{k_2 z} e^{i(\omega t - k_1 z)}$, що показує (оскільки k_2 від'ємне), що поглинання матеріалу виробляє експоненціальне згасання амплітуди хвилі з відстанню.

Хоча модель Кельвіна-Фойгта на сьогоднішній день є найбільш часто використовуваною моделлю в аналізі сейсмічної реакції ґрунтів, вона представляє лише одну з нескінченної кількості реологічних моделей. Переставляючи та додаючи більше пружин та контрольних точках, можна моделювати багато різних типів поведінки, хоча складність рішення хвильового рівняння різко зростає зі збільшенням кількості пружин та контрольних точок.

3.1.2.2. Параметри опису петлі гістерезису залежності «напруження-деформація»

Графік залежності «напруження-деформація» ґрунту в умовах циклічного навантаження відображає петлю гістерезису, показану на рис.3.4.

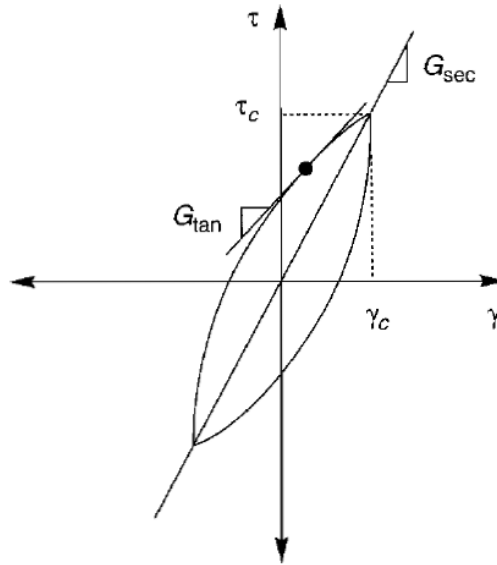


Рис.3.4 Січний модуль зсуву G_{sec} і дотичний (тангенціальний) модуль зсуву G_{tan}

Цю петлю гістерезису можна описати двома способами: фактичним шляхом самої петлі або параметрами, що описують її загальну форму. Загалом, двома важливими характеристиками форми петлі гістерезису є її нахил і широта. Нахил петлі залежить від жорсткості ґрунту, що може бути описано в будь-який момент процесу навантаження дотичним (тангенціальним) модулем зсуву G_{tan} . Очевидно, що G_{tan} змінюється протягом циклу навантаження, але його середнє значення всієї петлі може бути апроксимовано січним модулем зсуву G_{sec}

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c,$$

де τ_c і γ_c - амплітуди зсувного напруження та зсувної деформації відповідно. Таким чином, G_{sec} описує загальний нахил петлі гістерезису. Ширина петлі гістерезису пов'язана з площею, яка як міра розсіювання енергії може зручно бути описана коефіцієнтом поглинання D :

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{loop}}{G_{sec} \gamma_c^2},$$

де W_D - енергія, що розсіюється, W_S - максимальна енергія деформації, A_{loop} - площа петлі гістерезису. Параметри модуль зсуву G_{sec} (або просто G) і

коефіцієнт поглинання D також називають еквівалентними лінійними параметрами і використовуються при еквівалентному лінійному аналізі сейсмічної реакції ґрунту для опису поведінки ґрунту. Інші типи аналізів для врахування нелінійної залежності напруження-деформація вимагають фактичного шляху петлі гістерезису, як описано циклічною нелінійною або вдосконаленою конститутивною моделлю [Kramer, 1996].

3.2. Поширення хвилі зсуву в шаруватому середовищі з врахуванням нелінійного деформування ґрунту

3.2.1. Аналіз сейсмічної реакції ґрунту в частотній області

Виконуючи аналіз сейсмічної реакції ґрунтової товщі в частотній області розраховується горизонтальний відгук системи однорідних в'язкопружних ґрунтових шарів нескінченної горизонтальної протяжності на поперечну хвилю, що поширюється вертикально. При цьому використовується безперервне рішення одновимірного хвильового рівняння [Kanai, 1950], яке було адаптоване для перехідних рухів за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є [Cooley and Tukey, 1965].

Кожен ґрунтовий шар в системі характеризується своїм модулем зсуву, коефіцієнтом поглинання, щільністю і потужністю (товщиною). Передбачається, що модуль зсуву і коефіцієнт поглинання не залежать від частоти, але залежать від рівня деформації зсуву, що виникає в кожному шарі ґрунту. Залежність цих властивостей від деформації вводиться з використанням еквівалентної лінійної моделі ґрунту. Дана модель використовує ітераційну процедуру для отримання модуля зсуву і поглинання, сумісних з ефективною деформацією зсуву в кожному шарі. Передбачається, що основа ґрунтової товщі має довільні пружні властивості (скельний ґрунт), які не змінюються при деформації. Вхідні рухи (коливання) можуть бути задані на будь-якому рівні системи, а результуючі рухи можуть бути розраховані на будь-якому іншому рівні.

Розв'яжемо рівняння поширення поперечної хвилі у в'язкопружному шаруватому середовищі, що апроксимується моделлю Кельвіна-Фойгта:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad , \quad (3.15)$$

де u - зміщення; ρ - щільність; G - модуль зсуву; і η - коефіцієнт в'язкого поглинання. Використовуючи рівняння (3.15), розглядаємо поперечні хвилі, що поширюються вертикально вгору в ґрунтовій товщі складеній горизонтальними шарами, при цьому кожен шар є однорідним. На рис. 3.5 показаний приклад ідеалізованої моделі шаруватої ґрунтової товщі.

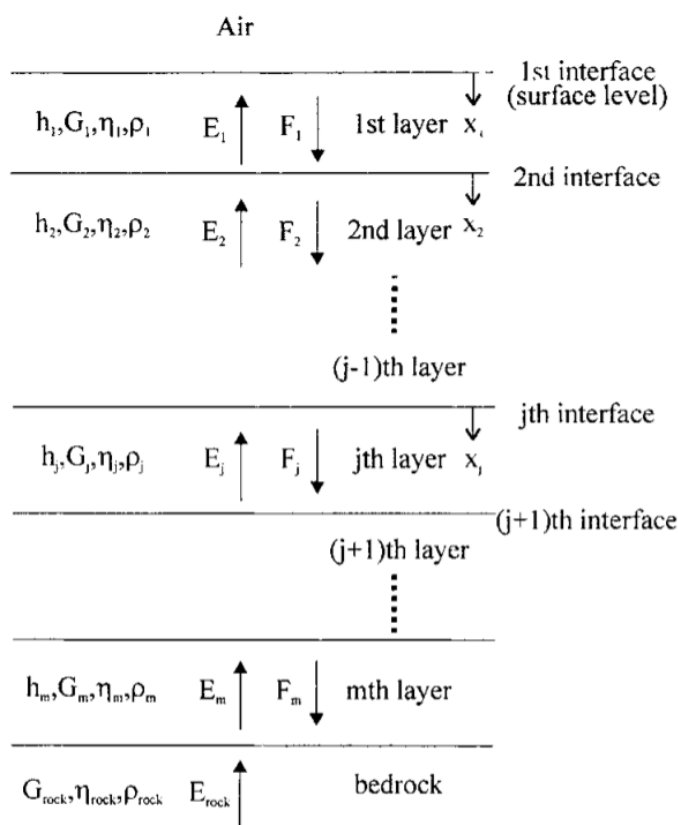


Рис. 3.5 Схематичне представлення ідеалізованої моделі шаруватої ґрунтової товщі.

Аналітичне рішення можна знайти шляхом застосування відповідних граничних умов неперервності напружень і зміщень на границях між шарами. Результуюче зміщення, наприклад, в j -ому шарі можна записати наступним чином [Schnabel et al., 1972]:

$u(x_j, \omega) = E_j(\omega) \cdot e^{ik_j x_j} + F_j(\omega) \cdot e^{-ik_j x_j}$, де ω - кутова частота, k - комплексне хвильове число, $k^2 = \frac{\rho\omega^2}{G+i\omega\eta} = \frac{\rho\omega^2}{G^*}$, G^* - комплексний модуль зсуву, який може бути розрахований за однією з формул:

$G^* = G(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2})$ [Udaka, Takekazu, 1975] - частотно-залежний модуль зсуву призводить до частотно-залежного поглинання. Застосування частотно-залежного модуля зсуву рекомендується використовувати з обережністю [Hashash et al., 2009];

$G^* = G(1 - D^2 + i2D)$ - спрощений частотно-незалежний комплексний модуль зсуву [Kramer, 1996];

$G^* = G(1 + i2D)$ - незалежний від частоти комплексний модуль зсуву [Kramer, 1996] і призводить до незалежного від частоти поглинання. Ця формула розрахунку комплексного модуля зсуву використовується в кодї SHAKE91 програмним продуктом Proshake [Proshake, 1998].

$$E_j(\omega) = \frac{1}{2} E_{j-1}(1 + \alpha_{j-1}) \cdot e^{ik_{j-1} h_{j-1}} + \frac{1}{2} F_{j-1}(1 - \alpha_{j-1}) e^{-ik_{j-1} h_{j-1}},$$

$$F_j(\omega) = \frac{1}{2} E_{j-1}(1 - \alpha_{j-1}) \cdot e^{ik_{j-1} h_{j-1}} + \frac{1}{2} F_{j-1}(1 + \alpha_{j-1}) e^{-ik_{j-1} h_{j-1}},$$

$$E_{rock}(\omega) = \frac{1}{2} E_m(1 + \alpha_m) \cdot e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m(1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m},$$

$$U_j(\omega) = E_j(\omega) + F_j(\omega),$$

де E - хвиля, що поширюється вгору; F - хвиля, що поширюється вниз; E_{rock} - хвиля, що поширюється вгору з нижнього півпростору (корінної породи) в ґрунтовий шар m ; h - потужність, α_j - відношення сейсмічних жорсткостей j -ого і $(j + 1)$ -ого шарів $\alpha_j = \frac{k_j G_j^*}{k_{j+1} G_{j+1}^*}$, D - коефіцієнт поглинання, x_j - локальна координата j -го шару; U_j - результуюче зміщення в j -ому шарі.

В роботі [Schnabel et al., 1972] вказується, що коефіцієнт поглинання D пов'язаний з η наступним рівнянням:

$$G+i\omega\eta=G\cdot(1+2iD) \text{ або } D=(\omega\cdot\eta)/2G.$$

Це рівняння базується на припущенні, що G і D багатьох типів ґрунтів майже не залежать від частоти [Schnabel et al. 1972]. В теорії механіки коливань незалежну від частоти модель називають ідеальною гістерезисною або структурною поглинаючою моделлю [Crandall, 1991].

Частотна характеристика, яка пов'язує амплітуди зміщення в $j-1$ і j -му шарах, має наступний вигляд:

$$H_{(j-1),j}(\omega) = \frac{|u_{j-1}(\omega)|}{|u_j(\omega)|} = \frac{E_{j-1}(\omega) + F_{j-1}(\omega)}{E_j(\omega) + F_j(\omega)}.$$

Частотна характеристика багатошарової ґрунтової товщі є складнішою, але вона так само розраховується, як і у випадку одного шару на півпросторі [Кендзера та ін. 2020, Kendzera et al., 2020].

Амплітудний спектр Фур'є на поверхні розраховується шляхом множення амплітудного спектра Фур'є вхідного сигналу на нижньому півпросторі на частотну характеристику ґрунтової товщі:

$Y_i(\omega) = H_{ij}(\omega)Y_j(\omega)$, де $Y_i(\omega)$ - амплітудний спектр Фур'є на поверхні, $Y_j(\omega)$ – амплітудний спектр Фур'є вхідного сигналу на півпросторі, $H_{ij}(\omega)$ – частотна характеристика шаруватої ґрунтової товщі.

Відомо, що модуль зсуву і коефіцієнт поглинання залежать від рівня деформації зсуву. Для опису зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання в літературі були запропоновані різні криві для різних типів ґрунтів [Seed, Idriss, 1970; Hardin, Drnevich, 1972; Vucetic, 1990; Vucetic, 1992; Roblee et al., 2004; Zhang, Andrus, Juang, 2005 тощо]. Оскільки розглянутий підхід вимагає постійних значень модуля зсуву G і коефіцієнта поглинання D в кожному шарі, проблема полягає в тому, щоб визначити ці значення таким чином, щоб вони відповідали величині збуджуваних в шарах деформацій. Для цього вводиться поняття рівня деформацій. В лабораторних тестах з

оцінювання залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини деформації зазвичай використовується гармонійне навантаження, і рівень деформацій характеризується його амплітудою. Однак зсувні деформації, які збуджуються в ґрунті реальним землетрусом, є нерегулярними. Максимальні пікові амплітуди досягаються вкрай рідко і лише в кількох випадках протягом запису.

Очевидно, що гармонійне навантаження відповідає більш жорстким умовам навантаження, ніж у випадку коливань реальних сейсмічних хвиль, за умови, що їх максимальні пікові амплітуди є однаковими. З огляду на це, рівень деформацій при землетрусі прийнято характеризувати в термінах ефективних зсувних деформацій, які емпірично оцінюються як 50 – 70% від величин максимальних зсувних деформацій. В роботі [Kramer, 1996] вказано, що в більшості випадків ефективні зсувні деформації приймаються рівними $\sim 65\%$ від максимальних пікових значень.

Оскільки розрахований рівень деформацій при аналізі сейсмічної реакції ґрунту на сейсмічні впливи залежить від значень модуля зсуву G і коефіцієнта поглинання D , для забезпечення відповідності цих параметрів до рівня деформацій у всіх шарах – використовуються ітеративні розрахунки, процедура яких схематично зображена на рис. 3.6.

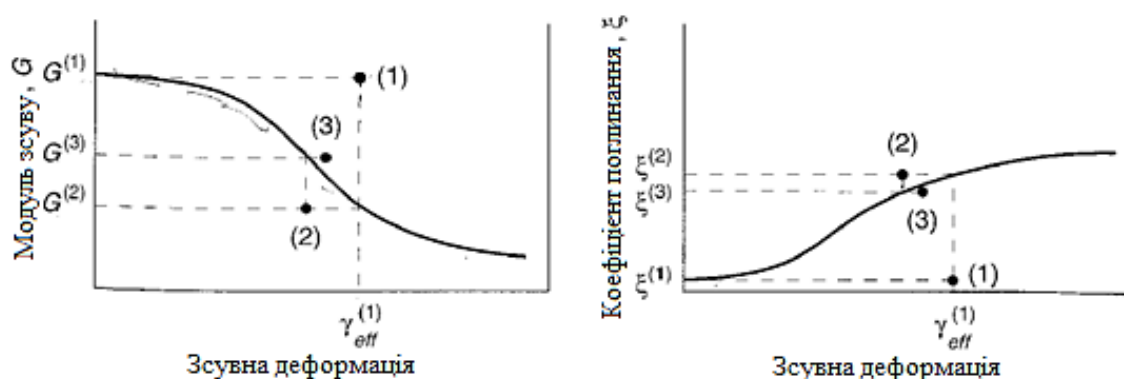


Рис. 3.6 Ілюстрація з роботи [Kramer, 1996] до процедури ітеративних обчислень: по заданих початкових значеннях G^1 і D^1 вираховуються ефективні зсувні деформації $\gamma_{eff}^{(1)}$. Верхній індекс вказує на номер ітерації.

Оскільки ефективні зсувні деформації $\gamma_{eff}^{(1)}$, як правило, є вищими, ніж деформації, які відповідають G^1 і D^1 , то їх приводять у відповідність з емпіричними значеннями залежностей G і D від величини деформацій, підібраними з бази даних для реальних параметрів кожного шару. Після цього проводиться наступна ітерація. В ній використовуються G^2 і D^2 відповідні величині $\gamma_{eff}^{(2)}$. Ітеративні розрахунки повторюються до досягнення значень G і D , які відповідають реальним деформаціям [Kramer, 1996].

Даний алгоритм перерахунку вхідного сейсмічного коливання з корінної породи на денну поверхню з врахуванням нелінійного зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта поглинання при збільшенні зсувної деформації реалізовано в еквівалентному лінійному аналізі реакції ґрунту на сейсмічні навантаження. Еквівалентний лінійний аналіз широко використовується з застосуванням програмних продуктів PROSHAKE [Schnabel, Lysmer, Seed, 1972; Proshake..., 1998], EERA [Bardet, Tobita, 2000], DEEPSOIL [Hashash, 2012] та ін.

Однак важливо визнати, що еквівалентно лінійний аналіз є лише наближенням фактичної нелінійної поведінки ґрунту. Припущення про лінійність, закладене в його використанні, має важливі наслідки, коли він використовується для аналізу сейсмічної реакції м'яких «сейсмічно слабких» ґрунтів при інтенсивних навантаженнях. Це також означає, що еквівалентно лінійний підхід не може використовуватися безпосередньо для проблем, пов'язаних з постійною деформацією або руйнуванням; еквівалентні лінійні моделі передбачають, що деформація завжди повернеться до нуля після циклічного навантаження, а оскільки лінійний матеріал не має обмежувальної міцності, руйнування не може відбутися. Тим не менше, припущення про лінійність дозволяє використовувати ефективно еквівалентно лінійний аналіз сейсмічної реакції ґрунту територій зі слабкою і помірною сейсмічністю. Оскільки в умовах малих і середніх деформацій застосування нелінійних складних моделей дає переоцінені результати. Таким чином, при аналізі

сейсмічної реакції ґрунту варто опиратись на вихідні дані, такі як прогнозовані величини сейсмічного навантаження і типи ґрунтів, що складають досліджувану ділянку та обирати метод аналізу враховуючи його рекомендації і обмеження щодо застосування.

3.2.1.1. Деконволюція

Оскільки еквівалентний лінійний підхід використовує лінійний аналіз, реакція в будь-якій точці може бути пов'язана з реакцією в будь-якій іншій точці. Таким чином, еквівалентний лінійний аналіз додатково є корисним в застосуванні, коли базове вхідне сейсмічне коливання необхідно оцінити, використовуючи зареєстроване сейсмічне коливання на поверхні. Ця процедура називається "деконволюція". Хоча деконволюція лінійнопружної системи теоретично повинна дати унікальне рішення, все ж, доволі часто, виникають практичні труднощі [Kramer, 1996]. Деякі з них можуть мати чисельний характер, особливо коли виникає необхідність ітерацій до сумісності властивостей ґрунту [Roesset, 1977], а рівні деформації великі. Інші труднощі пов'язані з обмеженнями щодо припущення, що все коливання є результатом вертикально поширюваних поперечних (зсувних) хвиль. В роботі [Silva, 1988] відмічається, що близько 75% потужності (87% амплітуди) у коливанні вільної поверхні може бути віднесено до вертикально поширюваних зсувних хвиль на частотах до 15 Гц; решта віднесена до розсіяних та поверхневих хвиль. В роботі [Silva, 1988] запропоновано процедуру деконволюції, засновану на використанні попередньо відфільтрованого (фільтр нижніх частот 15 Гц для усунення тенденції до розвитку нереально великих прискорень на глибині) коливання вільної поверхні та ітерації до сумісних із деформаціями властивостей, використовуючи 87% амплітуд вхідних коливань перед деконволюцією з використанням фільтрованого коливання вільної поверхні з повною (100%) амплітудою. Деконволюцію слід проводити з великою обережністю і ретельно оцінювати обґрунтованість будь-якого деконволюційного коливання.

3.2.2. Аналіз сейсмічної реакції ґрунту в часовій області

Хоча еквівалентний лінійний підхід зручний з обчислювальної точки зору і дає розумні результати аналізу для більшості ґрунтів при слабкій і помірній сейсмічності, все ж він залишається наближеним у випадку аналізу реакції сейсмічно слабких ґрунтів, здатних до розрідження в умовах інтенсивного сейсмічного навантаження. Альтернативним підходом є аналіз нелінійної сейсмічної реакції ґрунту з використанням прямого чисельного інтегрування в часовій області. Інтегруючи рівняння руху з невеликим кроком по часу, можна використовувати будь-яку лінійну або нелінійну модель напруження-деформації або розширену конститутивну модель [Kramer, 1996]. На початку кожного часового кроку звертаємось до відношення напруження-деформація, щоб отримати відповідні властивості ґрунту, які будуть використовуватися на цьому часовому кроці. За допомогою цього методу можна простежити нелінійну непружну залежність напруження від деформації у вигляді набору поступових невеликих лінійних кроків.

3.2.2.1. Моделі ґрунту в комп'ютерних програмах нелінійного аналізу сейсмічної реакції

Більшість доступних в даний час комп'ютерних програм нелінійного одновимірного аналізу сейсмічної реакції ґрунту характеризують поведінку напружено-деформованого ґрунту за допомогою циклічних моделей напружено-деформованого стану, таких як гіперболічна модель, модифікована гіперболічна модель, модель Рамберга-Модель Осгуда, модель Хардін-Дрневіча-Кундалла-Пайка (HDCP), модель Мартіна-Давиденкова і модель типу Айвена [Kramer, 1996]. Інші були засновані на просунутих конститутивних моделях, таких як модель вкладеної поверхні текучості [Prevost, 1989]. Деякі з найбільш часто використовуваних комп'ютерних програм для нелінійного одновимірного аналізу сейсмічної реакції ґрунту перераховані в Таблиці 3.1.

Комп'ютерні програми для нелінійного одновимірного аналізу сейсмічної реакції ґрунту

Комп'ютерна програма	Модель ґрунту	Література
CHARSOIL	Рамберга-Осгуда	[Streeter et al., 1973]
DESRA-2	Гіперболічна	[Lee and Finn, 1978]
DYNAID	Вкладена поверхня текучості	[Prevost, 1989]
MASH	Мартін-Давиденкова	[Martin and Seed, 1978]
NONLІ3	Айвена	[Joyner, 1977]
TESS1	Хардина – Дрневіча – Кундалла – Пайка (HDCP)	[Pyke, 1985]
DEEPSOIL	Модифікована гіперболічна модель	[Hashash, Park, 2001]
NERA	Айвена – Мроза (IM – модель)	[Bardet, Tobita, 2001]

В роботі [Ліа, 2018] відзначається, що поглинаючі властивості ґрунтів повинні бути теоретично включені в гістерезисний відгук, змодельований нелінійними моделями ґрунту. Однак, насправді, більшість моделей ґрунту дають майже нульове поглинання при малих деформаціях в порівнянні з отриманими значеннями з польових вимірювань. Тому в'язке поглинання часто використовується додатково до гістерезисного поглинання з нелінійних моделей ґрунту при аналізі сейсмічної реакції ґрунту. При невеликих рівнях деформації можна використовувати лінійне в'язке поглинання Релея для опису поглинаючих ефектів. З іншого боку, при розрахунках гістерезисного поглинання в області великих деформацій з використанням петель напруження-деформація, розвантаження-повторного навантаження в традиційних циклічних нелінійних моделях ґрунту з дотриманням правила Мазінга – можна отримати завищену оцінку поглинання.

Найбільш точним вважається метод представлення сейсмічної реакції ґрунту заснований на просунутих конститутивних моделях. При цьому використовуються основні принципи механіки для опису спостережуваної сейсмічної реакції ґрунту: (а) загальні умови початкового напруження, (б) широка множина траєкторій напружень, (в) обертові осі головних напружень, (d) циклічне або монотонне навантаження, (е) високі або низькі швидкості деформації, і (f) дреновані або недреновані умови.

Для таких моделей зазвичай необхідна границя текучості, яка описує: умови граничного напруження, при яких спостерігається пружна поведінка; закон зміцнення, який описує зміни розміру і форми границі текучості в міру виникнення пластичної деформації; і правило текучості, яке пов'язує збільшення пластичної деформації з приростом напруження. Моделі Cam-Clay [Roscoe, Schofield, 1963] і модифіковані Cam-Clay [Roscoe, Burland, 1968] були одними з перших моделей цього типу. Покращення в прогнозуванні зсувної деформації стали розробки обмежуючих моделей поверхні [Dafalias and Popov, 1979], які включають плавний перехід від пружної до пластичної поведінки. Детальний розгляд таких просунутих конститутивних моделей виходить за рамки цієї дисертаційної роботи. Більш детально просунуті конститутивні моделі розглядаються в роботах [Desai and Siriwardane, 1984; Dafalias and Herrmann, 1982; Wroth and Houlsley 1985; Lade, 1988; Wood, 1991 та ін.]. Хоча передові конститутивні моделі забезпечують значну гнучкість і універсальність в аналізі сейсмічної реакції ґрунтів на циклічне навантаження, їх опис зазвичай вимагає набагато більшої кількості параметрів, ніж еквівалентні лінійні моделі або циклічні нелінійні моделі. Оцінка цих параметрів може бути досить ускладнена, а параметри, отримані в результаті одного типу випробувань, можуть відрізнятися від параметрів, отриманих в результаті іншого. Хоча використання просунутих конститутивних моделей, безсумнівно, буде зростати, ці практичні проблеми на сьогоднішній день обмежують їх використання в інженерних розрахунках.

3.2.2.2. Метод явних кінцевих-різниць

Для інтегрування рівнянь руху можна використовувати ряд методів. Один з найточніших це метод явних кінцевих-різниць. Розглянемо ґрунтову товщу нескінченної бічної протяжності, як показано на рис. 3.7.

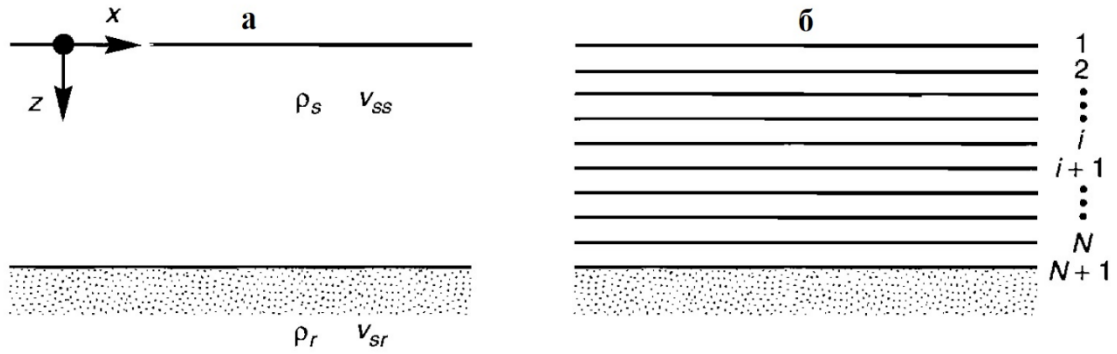


Рис. 3.7 Сукупність однорідних ґрунтових шарів нескінченної горизонтальної протяжності, що покривають корінні породи (а); дискретизація ґрунтової товщі на N шарів (б).

Якщо ґрунтова товща зондується горизонтальним коливанням на рівні корінних порід, реакція буде визначатися рівнянням руху

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} \quad (3.16)$$

Для представлення методу явних кінцевих різниць, розглянемо функцію $f(x)$, показану на рис.3.8.

Перша похідна від $f(x)$ при $x = \tilde{x}$ задається формулою

$$\frac{\partial f(\tilde{x})}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(\tilde{x} + \Delta x) - f(\tilde{x})}{\Delta x} \quad (3.17)$$

Доцільне наближення до першої похідної можна отримати, знявши обмеження границі і використовуючи мале, але кінцеве значення Δx . Таким чином, вираз рівняння (3.17) називається наближенням прямої різниці для $df(\tilde{x})/dx$. Рис. 3.8 показує, що пряма різниця фактично забезпечує краще наближення до похідної при $x = \tilde{x} + \Delta x/2$, ніж при $x = \tilde{x}$

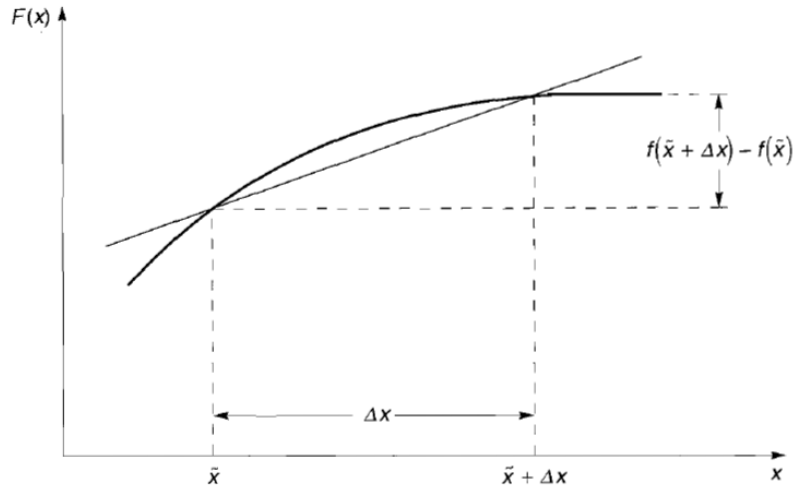


Рис. 3.8 Наближення прямої різниці $f'(\tilde{x})$ задане нахилом прямої, яка перетинає функцію в точках $x = \tilde{x}$ і $x = \tilde{x} + \Delta x$. Наближення стає точним при $\Delta x \rightarrow 0$

Розділивши ґрунтову товщу на N шарів потужністю Δz (рис. 3.7, б) і рухаючись в часовій області з невеликими приростами по часу Δt , позначення $u_{i,t} = u(z=i\Delta z, t)$ можна використовувати для запису кінцево-різницевого наближення до похідних:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z}, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{\dot{u}_{i,t+\Delta t} - \dot{u}_{i,t}}{\Delta t}. \quad (3.18)$$

Підстановка рівнянь (3.17) і (3.18) у рівняння руху дає змогу апроксимувати диференціальне рівняння явним кінцево-різницеvim рівнянням:

$$\frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z} = \rho \frac{\dot{u}_{i,t+\Delta t} - \dot{u}_{i,t}}{\Delta t}. \quad (3.19)$$

Отримаємо рішення для $\dot{u}_{i,t+\Delta t}$

$$\dot{u}_{i,t+\Delta t} = \dot{u}_{i,t} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}). \quad (3.20)$$

Рівняння (3.20) показує, як умови в момент часу t можна використовувати для визначення умов в момент часу $t+\Delta t$. Використовуючи рівняння (3.20) для всіх i , можна визначити швидкісну модель в момент часу $t+\Delta t$. Використовуючи розраховані швидкості в кінці кожного часового кроку в якості початкових швидкостей для наступного часового кроку, повторне застосування рівняння (3.20) дозволяє інтегрувати рівняння руху в серії невеликих часових кроків. Однак, як і в будь-якій задачі інтегрування, повинні виконуватися граничні умови. Оскільки поверхня ґрунтової товщі є вільною поверхнею і $\tau_1=0$, тоді

$$\dot{u}_{i,t+\Delta t} = \dot{u}_{i,t} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} \tau_{2,t}. \quad (3.21)$$

Граничні умови в основі ґрунтової товщі залежать від природи підстилаючої корінної породи. Якщо корінна порода жорстка, швидкість її частинок $\dot{u}_b(t) = \dot{u}_{N+1,t}$ може бути вказана безпосередньо як швидкість вхідного руху. Якщо корінна порода пружна, безперервність напружень вимагає, щоб зсувні напруження в нижній частині ґрунтового шару τ_{N+1} дорівнювали зсувним напруженням в верхній частині шару корінної породи $\tau_{r,t}$. Таким чином

$$\dot{u}_{N+1,t+\Delta t} = \dot{u}_{N+1,t} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (\tau_{r,t} - \tau_{N,t}). \quad (3.22)$$

Якщо падаюча хвиля, при поширенні вгору через корінну породу, має швидкість $\dot{u}_{r,t}(t)$ на границі ґрунтовий шар – корінна порода, тоді зсувне напруження можна апроксимувати згідно [Joyner and Chen, 1975]

$$\tau_{r,t} \approx \rho_r v_{sr} (2\dot{u}_r(t + \Delta t) - \dot{u}_{N+1,t+\Delta t}). \quad (3.23)$$

Підставивши рівняння (3.23) у рівняння (3.22) і вирішивши для $\dot{u}_{N+1,t+\Delta t}$, отримаємо

$$\dot{u}_{N+1,t+\Delta t} = \frac{\dot{u}_{N+1,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z} [2\rho_r v_{sr} \dot{u}_r(t + \Delta t) - \tau_{N,t}]}{1 + (\Delta t / \rho\Delta z) \rho_r v_{sr}}. \quad (3.24)$$

Після того, як граничні умови встановлені, інтегральні розрахунки тривають від основи ($i = N + 1$) до верхнього шару ($i = 1$) ґрунтової товщі на кожному кроці по часу, і крок за кроком в часовій області. Однак розрахунки швидкості в кінці кожного часового кроку вимагають знання дотичного напруження на цьому часовому кроці. Якщо ґрунтова товща спочатку знаходиться в стані спокою, то $\dot{u}_{i,t=0} = 0$ і $\tau_{i,t=0} = 0$ для всіх i . Коли вхідний рух в формі $\dot{u}_b(t)$ (жорстка корінна порода) або $\dot{u}_r(t)$ (пружна корінна порода) надає деяку швидкість основі ґрунтової товщі, \dot{u}_{N+1} прийме нульове значення. У наступних часових кроках $\dot{u}_N, \dot{u}_{N-1}, \dot{u}_{N-2}, \dots$ будуть приймати значення відмінні від нуля, по мірі того, як ґрунтові шари переміщуються у відповідь на вхідний рух. Додаткове зміщення на кожному часовому кроці визначається виразом

$$\Delta u_{i,t} = \dot{u}_{i,t} \cdot \Delta t. \quad (3.25)$$

Підсумовування додаткових зміщень дозволяє визначити загальне зміщення $u_{i,t}$ на початку кожного кроку по часу. Деформація зсуву в кожному шарі задається

$$\gamma_{i,t} = \frac{\partial u_{i,t}}{\partial z} \approx \frac{u_{i+1,t} - u_{i,t}}{\Delta z}. \quad (3.26)$$

Якщо передбачається, що ґрунт є лінійно пружним, зсувне напруження залежить тільки від поточної зсувної деформації (тобто $\tau_{i,t} = G_i \gamma_{i,t}$). Однак, якщо ґрунт нелінійний і непружний, зсувне напруження буде залежати від поточної зсувної деформації та історії послідовності напружень. У таких випадках, для визначення відповідного зсувного напруження $\tau_{i,t}$ використовуються розрахована зсувна деформація $\gamma_{i,t}$ і циклічна залежність напруження - деформація (або розширена конститутивна модель).

Процес інтегрування можна узагальнити в такий спосіб [Kramer, 1996]:

1. На початку кожного часового кроку, швидкості частинок $\dot{u}_{i,t}$ і загальне зміщення $u_{i,t}$ відомі на границі кожного шару.

2. Глибинна модель зміщень частинок використовується для визначення зсувної деформації $\gamma_{i,t}$ всередині кожного шару.

3. Залежність напруження-деформація застосовується для визначення зсувного напруження $\tau_{i,t}$ в кожному шарі. Крива напруження-деформація може бути лінійною або нелінійною. Якщо передбачається нелінійна непружна поведінка ґрунту, інверсії напрямків перевіряються та враховуються (наприклад, за допомогою застосування критеріїв Masing) у кожному шарі ґрунтової товщі.

4. Вхідний рух використовується для визначення коливання основи ґрунтової товщі в момент часу $t + \Delta t$.

5. Параметри коливання на границі кожного шару в момент часу $t + \Delta t$ розраховується знизу вгору. Потім процес повторюється з кроку 1 до розрахунку реакції на наступному кроці по часу.

Оскільки швидкості руху частинок розраховуються в моменти часу, які відрізняються на половину часового кроку від тих, при яких зсувні напруження найкращим чином апроксимуються, явний метод кінцевих різниць може стати чисельно нестійким, якщо часовий крок занадто великий (тобто, якщо $\Delta t > \Delta z / v_{ss}$) [Davis, 1986]. Використовуючи різні вирази різниці, формулювання неявної кінцевої різниці може усунути проблему стійкості, дозволяючи тим самим використовувати більш тривалі кроки по часу. Неявні формулювання, однак, передбачають рішення набору одночасних рівнянь $N + 1$ (що може вимагати значних розрахункових затрат часу для великих N) на кожному кроці по часу. Часто важко передбачити, чи ефективніше здійснювати швидкі обчислення явного методу з великою кількістю кроків по часу, або більш трудомісткі розрахунки неявного методу з меншою кількістю часових кроків. Більшість існуючих комп'ютерних програм для нелінійного аналізу сейсмічної реакції ґрунту використовують явне формулювання.

3.3. Нелінійні параметри ґрунту залежні від деформації зсуву

Реальний ґрунт являє собою складний матеріал, який веде себе нелінійно і часто демонструє залежну від часу поведінку при навантаженні змінних в часі напружень, а при циклічному навантаженні він може проявляти складну поведінку, пов'язану з нерівномірним навантаженням, ущільненням, створенням порового тиску тощо. Відповідно, для більш реалістичних результатів аналізу сейсмічної реакції ґрунту є потреба в більш спеціалізованих конститутивних законах, які можуть включати як гістерезисний характер поглинання, так і залежність модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від амплітуди деформації зсуву.

Дисипація енергії відбувається навіть при досить малому рівні зсувної деформації [Darendeli, 2001]. На сьогоднішній день немає теорії яка б це пояснила, оскільки теоретично поглинання енергії існує тільки тоді, коли деформація ґрунту перевищує порогове значення.

В інженерному застосуванні значна увага приділяється дослідженням характеру зменшення модуля зсуву G і збільшення коефіцієнта поглинання D при зсувній деформації для різних типів ґрунтів. Визначення модуля зсуву сумісних деформацій і значення поглинання по кожному шару є основою розробки математичної моделі шаруватої ґрунтової товщі.

У геотехнічній інженерії типовий спосіб визначення коефіцієнта поглинання ґрунту полягає в тому, щоб зв'язати його з рівнем деформації зсуву або відношенням модуля зсуву до максимального (початкового) модуля зсуву G/G_{max} . У роботах [Borden, Shao, Gupta, 1996; Ishibashi, Zhang, 1993] встановлено зв'язок між коефіцієнтом поглинання D і модулем зсуву G , використовуючи поліноміальний вираз. Хардін і Дрневіч [Hardin, Drnevich, 1972] запропонували визначення кривої коефіцієнта поглинання наступним рівнянням:

$$\frac{D}{D_{max}} = \frac{\gamma / \gamma_r}{1 + (\gamma / \gamma_r)} = 1 - \frac{G}{G_{max}},$$

де D_{max} - максимальний коефіцієнт поглинання ґрунту, який залежить від типу ґрунту, обмежувального тиску, кількості та частоти циклічних навантажень.

В приведеній моделі поглинаючих властивостей ґрунту не враховується вплив показника пластичності (I_p), хоча це досить важливий параметр, що впливає на поглинаючі властивості ґрунту. При еталонному обмежувальному тиску ґрунту $p_a=100$ кПа коефіцієнт поглинання при малих деформаціях (D_{min}) збільшується пропорційно збільшенню I_p :

$D_{min(ss)}=a(I_p)+b$, де a і b є підгінними параметрами і можуть бути прийняті рівними 0,008 і 0,82, відповідно.

В роботах [Darendeli, 2001; Stokoe et al., 2004] запропоновано доволі просте рівняння визначення коефіцієнта поглинання припускаючи поведінку поглинання Мазінга [Masing, 1926; Vucetic, 1990] і регулюючу функцію ($f(G/G_{max})$) для узгодження поглинання Мазінга з експериментальними даними, а також шляхом подальшого додавання D_{min} для розрахунку повного поглинання:

$D=f(G/G_{max})+ D_{min}$, де D_{min} можна розрахувати, перетворивши $D_{min(ss)}$ при обмежувальному тиску σ'_m , замість еталонного обмежувального тиску p_a :

$D_{min}= D_{min(ss)}(\sigma'_m/p_a)^{-0,5k}$, де $p_a=100$ кПа (еталонний атмосферний тиск); k - показник корекції напруження в залежності від I_p та геологічного віку [Zhang et al., 2005].

Оскільки значення $f(G/G_{max})=D-D_{min}$ також залежать від частоти, Чжан та його колеги [Zhang et al., 2005] запропонували, що більш точні залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації базуються на результатах випробувань на крутильний зсув:

$$f(G/G_{max})=10,6 (G/G_{max})^2-31,6(G/G_{max})+21,0$$

З наведеного вище рівняння видно, що коли $G/G_{max}=1$, тобто в умовах нульової деформації або малих деформацій повне поглинання D дорівнює D_{min} . Та коли $G/G_{max}=0$, тобто в умовах великих деформацій $D - D_{min}$ складає 21%.

В роботах [Sugito et al., 1994] and [Assimaki et al., 2000] рекомендується враховувати в аналізі сейсмічної реакції ґрунту залежність коефіцієнта поглинання від частоти.

Дані випробувань характеристик деформації циклічним зсувом були опубліковані різними дослідниками. В роботі [Woods, 1991] представлені методи випробувань на циклічне випробування на зсув і технічні документи по цим методам випробувань.

В таблиці 3.2 наведено класифікацію запропоновану в роботі [Richart, 1977] за результатами тестових випробувань.

Таблиця 3.2

Класифікація ґрунтів на основі геологічного віку та умов формування

Геологічний вік		Формування		Геологічна категорія	Кількість даних
Штучний		Штучні	Глинистий ґрунт	1-Bc	10
			Піщаний ґрунт	2-Bs	14
Голоцен	Верхній	Еолові	Піщаний ґрунт	3-As	2
			Морські	Піщаний ґрунт	4-As
			Гравій	5-Ag	0
		Солонувата вода	Глинистий ґрунт	6-As	5
			Піщаний ґрунт	7-As	20
		Флювіальні	Торф	8-Ap	5
			Глинистий ґрунт	9-As	29
			Піщаний ґрунт	10-As	27
			Гравій	11-Ag	0
		Нижній	Морські	Глинистий ґрунт	12-As
	Піщаний ґрунт			13-As	32
	Флювіальні		Гравій	14-Ag	0

Плейстоцен	Верхній	Морські, солончакова вода	Глинистий грунт	15-As	18
			Піщаний грунт	16-As	4
	Верхній	Вулканічний попіл	Суглинок	17-Lm	14
			Глинистий грунт	18-Dc	7
			Піщаний грунт	19-Ds	0
			Гравій	20-Dg	0
	Середній	Вулканічний попіл	Суглинок	21-Lm	0
			Глинистий грунт	22-Dc	75
			Піщаний грунт	23-Ds	93
			Гравій	24-Dg	1
Пліоцен – плейстоцен	Нижній Плейстоцен, Верхній Пліоцен	Морські відклади	Аргіліт	25-Dc	4
			Піщано- гравійна порода	26-Dsg	0

Порівняння тестових даних зміни модуля зсуву і коефіцієнта поглинання і загальна характеристика та класифікація ґрунтів результатів наведено також в роботах [Kokusho,1987; Ishihara, 1982; Kokusho, 1992; Kokusho, Matsumoto, 1998; JGS, 2007 тощо].

Згідно вимог МАГАТЕ для виконання надійного і реалістичного аналізу сейсмічної реакції, характерної для майданчика, залежна від деформації зміна властивостей ґрунтового матеріалу повинна базуватись на типових даних, при умові що типи ґрунту правильно співвіднесені з типовою класифікацією.

За результатами аналізу звітів інженерно-вишукувальних робіт та результатів тестів динамічних випробувань ґрунтів в роботах [Hardin, Drnevich, 1972; Tatsuoka, Iwasaki, Takagi, 1978; Isenhower, Stokoe, 1981; Kokusho,1987; Ishihara, 1982; Ishibashi, Zhang, 1993; Delfosse Ribay et al., 2004; Stokoe et al., 2004; Zhang, Andrus, Juang, 2005; JGS, 2007, Ha Giang et al., 2017 та ін.] виділено показники характеристики ґрунту для встановлення відповідності класифікаціям ґрунтів запропонованих дослідниками згаданих в даному розділі

та інших. До основних показників віднесено геологічний вік, глибина залягання і глибина залягання відносно відмітки рівня ґрунтових вод тощо.

Висновки до Розділу 3

В розділі розглянуто теоретичні основи методів аналізу сейсмічної реакції шаруватого ґрунту в задачах інженерної сейсмології. Розглянуто широкий спектр фізичних параметрів сейсмічних коливань ґрунту і їх використання в задачах сейсмічного районування. Проаналізовано чисельні еквівалентно лінійний і нелінійний методи врахування нелінійного деформування ґрунту в задачах сейсмічного районування, оскільки реальний ґрунт, навіть, при невеликих сейсмічних навантаженнях проявляє нелінійну поведінку. Приводяться розв'язки задачі сейсмічної реакції ґрунту в часовій та частотній області.

Аналізуються основні параметри ґрунту, які визначають форму гістерезисних залежностей напруження-деформація, а саме: модуль зсуву, максимальний модуль зсуву, закон зменшення модуля зсуву при навантаженні ґрунту, коефіцієнт поглинання, максимальний коефіцієнт поглинання закон збільшення коефіцієнт поглинання зі збільшенням амплітуди зсувної деформації. Описано особливості визначення цих параметрів в лабораторних і польових експериментах і вплив на них інженерно-геологічних умов залягання ґрунту і умов його навантаження.

Розроблено методику для побудови математичних моделей коливань шаруватого ґрунту, що описуються параметрами, залежними від рівня деформації, які враховують прийняту типову класифікацію, узгоджену з рекомендаціями МАГАТЕ, для аналізу сейсмічної реакції ґрунтових комплексів, характерних для майданчиків промислових об'єктів на території України. Виділено показники характеристики ґрунту для встановлення відповідності прийнятих МАГАТЕ класифікаціям ґрунтів. До основних показників при визначенні зміни нелінійних параметрів ґрунту зі збільшенням деформації кожного ґрунтового шару віднесено: геологічний вік, глибина залягання і глибина залягання відносно відмітки рівня ґрунтових вод тощо.

Перелік використаних джерел до розділу 3

1. Assimaki D., Kausel E., Whittle A.J. (2000). Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils. *J Geotech Geoenviron Eng* 126(10), 859–869.
2. Bardet J. P., Ichii K., Lin C. H. (2000). EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
3. Bardet J. P., Tobita T. (2001). NERA. A computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered Soil Deposits. Los Angeles: Univ. of Southern California. 44 p.
4. Borden R.H., Shao L., Gupta A. (1996). Dynamic properties of piedmont residual soils. *J Geotech Eng* 122(10):813–821.
5. Cooley, J.W. and Tukey, J.W. (1965). "An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series," *Math, of Computation*, 19, p 297, Apr.
6. Crandall, S. H. (1991). "The hysteretic damping model in vibration theory." *Proc., Inst. Mech. Engrs., London*, 205, 23–28.
7. Dafalias Y. F., Popov E.P. (1979). "A model for nonlinearly hardening materials for complex loading," *Acta Mechanica*, Vol. 21, No.3, pp. 173-192.
8. Dafalias Y.F., Herrmann L.R. (1982). "Bounding surface formulation of soil plasticity," Chapter 10 in G.N. Pande and O.C. Zienkiewicz, eds., *Soil Mechanics: Transient and Cyclic Loads*, Wiley, New York, pp. 253-282.
9. Darendeli M.B. (2001) Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin
10. Davis J. L. (1986). *Finite Difference Methods in Dynamics of Continuous Media*, Macmillan, New York, 238 p.
11. Delfosse Ribay E, Djeran Maigre I, Cabrillac R, Gouvenot D. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dyn Earthq Eng* 2004;24:461–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.02.004>.

12. Desai C. S., Siriwardane H. J. (1984). *Constitutive Laws for Engineering Materials, with Emphasis on Geologic Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 468 p.
13. GovindaRaju L., Ramana G.V., Hanumantha C., Sitharam T.G. (2004). Site-specific ground response analysis. *Current Sci* 87(10):1354–1362
14. Ha Giang, P. H., Van Impe, P. O., Van Impe, W. F., Menge, P., Haegeman, W. (2017). Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 371–379. doi:10.1016/j.soildyn.2017.06.016
15. Hardin B.O., Drnevich V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *J Soil Mech Found Div* 98(SM7):667–692
16. Hashash Y. M. A., Park D. (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. *Engineering Geology* 62(1-3), 185—206.
17. Hashash Y. (2012). *DeepSoil User Manual and Tutorial*. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. 107 p.
18. Hashash Y.M.A., Groholski, D.R., Phillips, C. A., Park, D. (2009). “DEEPSOIL V3.7beta, User Manual and Tutorial”, 88p.
19. Isenhowe W. M., Stokoe K. H. (1981). Strain Rate Dependent Shear Modulus of San Francisco Bay Mud: Proc. of the International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics, University of Missouri-Rolla. 2, 597—602.
20. Ishibashi I., Zhang X.J. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found* 33(1):182–191.
21. Jia J. (2018). *Soil Dynamics and Foundation Modeling*, Springer International Publishing AG – 2018. 740 p DOI:10.1007/978-3-319-40358-8.
22. José M. (2015). *Wave fields in real media: wave propagation in anisotropic, anelastic, porous and electromagnetic media*. Third Edition. Carcione. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 690 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18893-9>

23. Joyner W. B. (1977). "NONLI3: A Fortran program for calculating nonlinear ground response," Open File Report 77-761, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California.
24. Joyner W. B., Chen A. T. F. (1975). Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 65(5), 1315—1336.
25. Kanai K. (1950). "The Effect of Solid Viscosity of Surface Layer on the Earthquake Movements," *Bull. Earthquake Research Institute*, 28.
26. Kokusho T. (1987). In-situ dynamic soil properties and their evaluation. In: *Proceedings of the 8th Asian Regional Conference of SMFE, Kyoto, vol II*, pp 215–240.
27. Kokusho T. (1992). Dynamic characteristics of ground, lecture: analytical method of the interaction between ground and structure. *Tsuchi-to-Kiso* 40(No. 4):76–84 (in Japanese).
28. Kokusho T., Matsumoto M. (1998). Nonlinearity in site amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake. *Soils Found. Special Issue*, 1-9.
29. Kokusho T., Yoshida Y., Esashi Y. (1982). Dynamic properties of soft clay for wide strain range. *Soils Found.* 22(4), 1-18.
30. Kolsky H. (1963). *Stress waves in solids*, Dover Publications, New York, 213 p.
31. Kramer S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
32. Lade P.V. (1988). "Effects of voids and volume changes on the behaviour of frictional materials," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 12, 351-370.
33. Lee M.K., Finn W.D.L. (1978). DESRA-2, dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential. *Soil Mechanics Series, No. 36*, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

34. Martin P. P., Seed H. B. (1978). MASH: A computer program for the non-linear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits. University of California, Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 78-23, Berkley, California.
35. Masing G. (1926). Eigenspannungen und Verfertigung beim Messing. In: Proceedings of 2nd international congress on applied mechanics, Zurich.
36. NS-G-2.13 «Оценка сейсмической опасности существующих ядерных установок». Руководство по безопасности. Серия норм по безопасности. МАГАТЭ, Вена, 2014.
37. Prevost I.H. (1989). DYNAID: a computer program for nonlinear seismic site response analysis Technical documentation, Report NCEER-89-0025, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
38. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 1998, 54 p.
39. Richart F.E. Jr. (1977). Dynamic stress-strain relationships for soils, S-O-A paper. In: Proceedings of 9th ICSMFE, Tokyo, 3, 605–612
40. Roblee C., Chiou B. (2004) "A proposed geindex model for design selection of nonlinear properties for site response analyses." Caltrans Geo-Research Group. Sacramento, CA.
41. Roesset J.M. (1977). "Soil amplification of earthquakes," Chapter 19 in C.S. Desai and J.T. Christian, eds., Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw-Hill, New York, 639-682.
42. Roscoe K.H., Burland J.B. (1968). "On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay," in J. Heyman and F.A Leckie, eds., Engineering Plasticity, University Press, Cambridge, 535-609.
43. Roscoe K.H., Schofield A.N. (1963). "Mechanical behavior of an idealised 'wet' clay," Proceedings, 2nd European Conference on Soil Mechanics, Wiesbaden, Germany, 1, 47-54.

44. Schnabel P.B. Lysmer J. and Seed H.B. (1972). SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. - Report No. UCB. EERC-72/12. University of California, Berkeley. December. 102 p.
45. Schnabel R.H. Shao L., Gupta A. (1996). Dynamic properties of piedmont residual soils. *J Geotech Eng* 122(10):813–821
46. Seed H. B. and Idriss I. M. (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses." Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 40p.
47. Silva W.J. (1988). "Soil response to earthquake ground motion," EPRI Report NP-5747, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
48. Stokoe K.H., Darendeli M.B., Gilbert R.B., Menq F.Y., Choi W.K. (2004). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. In: Proceedings NSF/PEER international workshop on uncertainties in nonlinear soil properties and their impact on modelling dynamic soil response, University of California at Berkeley, Berkeley, California
49. Streeter V.L., Wylie E. B., Richart Jr., F.E. (1974). CHARSOIL: Soil motion computations by characteristics method. *J. Geotech. Eng. Div.* 100 (3), 247—263.
50. Sugito M., Goda H., Masuda T. (1994). Frequency dependent equi-linearized technique for seismic response analysis of multi-layered ground, *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu. Proc Jpn Soc Civ Eng* 493(3–2):49–58
51. Tatsuoka F., Iwasaki T., Takagi Y. (1978). Hysteretic damping of sands and its relation to shear modulus. *Soils Found.* 18, 25—40.
52. Udaka, Takekazu (1975). "Analysis of Response of Large Embankments to Traveling Base Motions," Department of Civil and Environmental Engineering. Berkeley: University of California, 346.
53. Vucetic M. (1990). Normalized behavior of clay under irregular cyclic loading. *Can Geotech J* 27:29–46

54. Vucetic M. (1992). "Soil Properties and Seismic Response." In Proceedings of 10th World Conference of Earthquake Engineering, July 19 – 24, Madrid, Spain, 1199 – 1204.

55. Wood D.M. (1991). Approaches to modelling the cyclic stress-strain response of soils," Chapter 2 in M.P. O'Reilly and S.P. Brown, eds, Cyclic Loading of Soils, Blackie, London, 19-69.

56. Woods R.D. (1991). Field and laboratory determination of soil properties at low and high strains, SOA paper. In: Proceedings of second international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics, St. Louis, 1727–1741.

57. Wroth C.P., Houlsby G.T. (1985). "Soil mechanics - Property characterization and analysis procedures," Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1, 1-55.

58. Zhang J., Andrus R., Juang C. (2005). Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. J. Geotech. Geoenviron. Engng 131, 4, 453–464.

59. Zhang J., Andrus R.D., Juang C.H. (2005). Normalized shear modulus and material damping ratio relationships. J Geotech Geoenviron Eng, 131(4), 453–464 ASCE.

60. Ишихара К. (2006). Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 383 с.

РОЗДІЛ 4. ТРАНСФОРМАЦІЯ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ В ШАРУВАТІЙ ГРУНТОВІЙ ТОВЩІ

Характеристики поширення сейсмічних хвиль на шляху від розлому до корінної породи і на шляху від інженерного сейсмічного шару до поверхні землі істотно розрізняються. У першому випадку хвиля випромінюється у всіх напрямках, а в другому – в одному напрямку. Коли хвиля поширюється в усіх напрямках, амплітуда зменшується в міру розширення фронту хвилі, а відстань від розлому збільшується [Chopra, 1981; Hashash and al., 2016; Yoshida, 2014; Kramer, 1996]. Це явище відоме як згасання сейсмічних хвиль. Приклад згасання сейсмічних хвиль з відстанню показаний на рис. 4.1. PGA і PGV по осі ординат означають пікове прискорення ґрунту і швидкість відповідно.

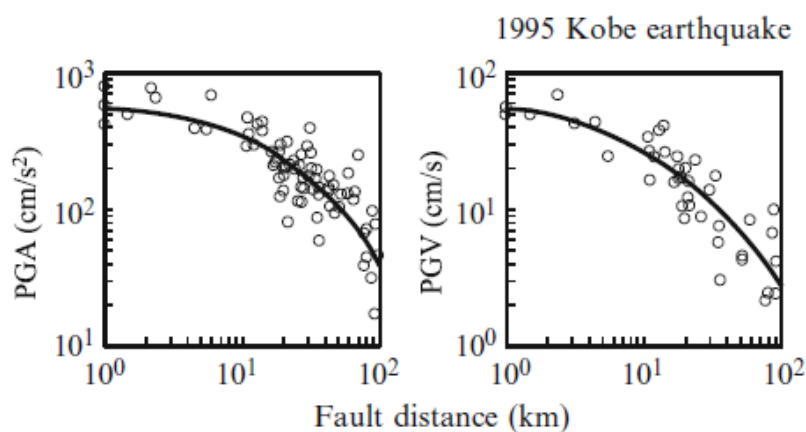


Рис. 4.1 Приклад згасання хвилі з відстанню [Si and Midorikawa, 1999]

Фактор згасання з відстанню записується у вигляді:

$$D(f) = \exp[-\pi f r / Q(f)V]P(f),$$

де Q – частотно-залежний фактор згасання в середовищі, різний для різних регіонів;

$$P(f) = \exp(-\pi K_0 f).$$

З іншого боку, такого згасання не відбувається, коли хвиля поширюється в одному напрямку, працюють різні механізми, і в результаті відбувається посилення і / або ослаблення.

4.1. Основні механізми трансформації сейсмічних хвиль в ґрунтових шарах

На сьогоднішній день розглядаються три основні механізми трансформації сейсмічних хвиль в ґрунтах.

Перший механізм перетворення, це підсилення сейсмічних коливань внаслідок переходу сейсмічних хвиль в верхні шари з меншими значеннями густини і швидкостей об'ємних хвиль. Пружні властивості ґрунту видозмінюються від твердих (важко деформуються – наприклад, граніт) до м'яких (легко деформуються – наприклад, мул). Сейсмічні хвилі проходять через тверді ґрунти швидше, ніж через м'які. При поширенні сейсмічних коливань від нижче розташованих твердих ґрунтів, до приповерхневих м'яких, швидкість сейсмічних хвиль зменшується, а амплітуда збільшується. При цьому відбувається перехід потенційної енергії в кінетичну та накопичення енергії коливань при багатократному їх відбиванні в шарах ґрунту. Цей механізм базується на фізичній закономірності поширення сейсмічних коливань в ґрунтовій товщі, завдяки якій величина потоку хвильової енергії залишається постійною [Gutenberg, 1957; Aki and Richards, 1980]. В результаті амплітуда сейсмічної хвилі буде вищою в низько швидкісному ґрунтовому шарі, порівняно з високо швидкісним.

Другий механізм, це резонансні підсилення коливань, які виникають, коли частота коливань сейсмічної хвилі співпадає з частотою власних коливань ґрунтових відкладів.

Характеристики підсилення системи з одним ступенем свободи, що піддається збуренню синусоїдальними коливаннями, показані на рис.4.2, де ω_0 – власна кругова частота, що визначається лише масою і жорсткістю пружини цієї системи. Найбільше підсилення відбувається, коли кругова частота синусоїдального вхідного руху ω збігається з ω_0 , що називається резонансом.

Те ж саме відбувається і в ґрунтовій товщі. Різниця в тому, що ґрунт є континуумом або системою з нескінченними ступенями свободи. Якщо виконуються певні умови, під час багаторазових відбиттів між поверхнею землі

і нижчого рівня шарами утворюється стаціонарна хвиля, і хвиля землетрусу посилюється. У разі жорсткого підстилаючого півпростору зміщення стаціонарної хвилі дорівнює нулю біля основи і стає найбільшим біля поверхні. Четверта частина синусоїдальної хвилі задовольняє цій умові для однорідного ґрунту [Yoshida, 2015].

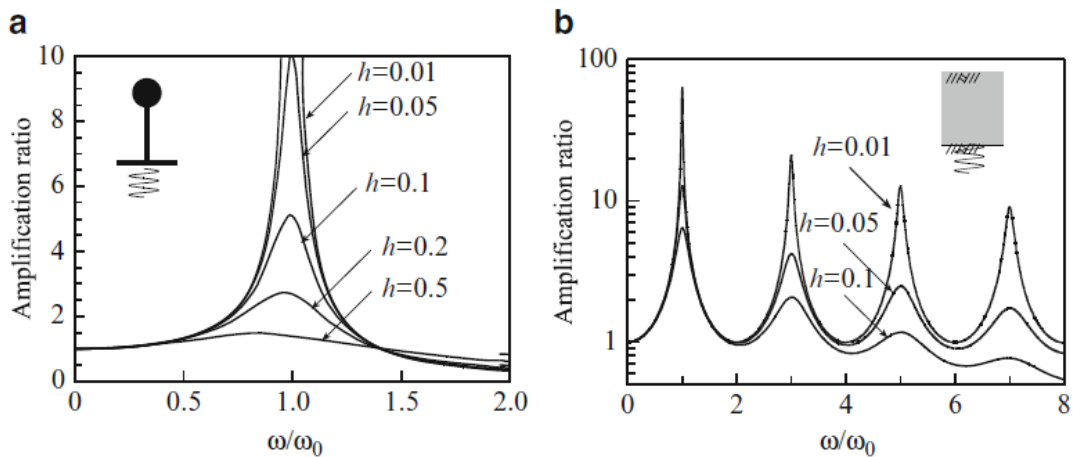


Рис. 4.2 Підсилення сейсмічних коливань: (а) система з одним ступенем свободи; (б) континуум або система з нескінченними ступенями свободи

Спрощено оцінку власної частоти ґрунтового масиву для поперечної, або поздовжньої хвилі визначається за формулою [Будівництво,...2014]:

$$f_n = \frac{V}{4H}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi V_s}{2H},$$

де V_s – швидкість поперечної хвилі, H – потужність ґрунтового масиву, T – переважаючий період підсилення сейсмічної хвилі, ω_0 - переважаюча кругова частота підсилення сейсмічної хвилі.

В цьому випадку четверта частина довжини хвилі дорівнює потужності (товщині) поверхневого шару. Те саме явище відбувається, коли потужність H дорівнює 3, 5, 7,... четвертій частині довжини хвилі. Переважаючі періоди вищих мод стають меншими, і найбільше підсилення відбувається в першій моді або коли потужність H дорівнює четвертій частині довжини хвилі, що видно на рис. 4.2 (б). Якщо ґрунтова товща неоднорідна, форма стаціонарної

хвилі не є синусоїдальною, а переважаючі періоди не мають постійних кратних довжинам хвиль.

Якщо частота коливань в сейсмічній хвилі є близькою до власної частоти ґрунтової товщі, відбувається збільшення амплітуди коливання ґрунту на цій частоті. Величина підсилення залежить від співвідношення (контрастності) жорсткостей шарів ґрунтової товщі

$$I = \frac{\rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2}}$$

де ρ_1 – густина ґрунтового шару, а індекс 1 відноситься до нижнього шару, індекс 2 до шару розташованого вище. Коефіцієнт підсилення коливань зростає із збільшенням відношення жорсткості шарів. Відношення жорсткостей між шарами також називається контрастом імпедансів [Kramer, 1996].

Ґрунти з низькою швидкістю поперечної хвилі, особливо коли вони підстилаються твердими кристалічними породами, можуть значно підсилювати амплітуди сейсмічних коливань, потенційно здатних викликати зменшення несучої здатності ґрунту, що може привести до руйнування споруди або її окремих конструкцій. Великий контраст швидкості між молодими низькошвидкісними м'якими відкладами та древнім палеозойським фундаментом створює сильний контраст сейсмічної жорсткості - границю відбиття, заломлення і пере випромінювання сейсмічної енергії та фазового перетворення сейсмічних хвиль [Chen, 1985; Chen et al., 1996].

Третій механізм перетворення сейсмічних коливань, спричинений нелінійністю взаємозв'язку між напруженням і деформацією ґрунтових шарів, що приводить, як правило, до ослаблення коливань і пониження резонансних частот. Як виняток, в водонасичених ґрунтах нелінійність залежності напруження-деформація може призводити і до збільшення амплітуд коливань при великих деформаціях.

Результатом дії трьох механізмів зазвичай є підсилення слабких сейсмічних коливань в ґрунтах і ослаблення сильних [Yoshida, Iai, 1998]. Ці механізми взаємопов'язані і враховуються в програмах розрахунку сейсмічної

реакції ґрунту на динамічні навантаження. Прояви перших двох механізмів залежать від співвідношення довжини хвилі і товщини шару. При малій товщині шару, порівняно з довжиною хвилі, амплітуди коливань в шарі визначаються тільки його сейсмічною жорсткістю. При збільшенні товщини шару проявляються його резонансні властивості, і додаткове зростання амплітуди може бути трьох-чотирикратним. Якщо осадові відклади горизонтально шаруваті, резонансні явища мають місце тільки для об'ємних хвиль, що поширюються вертикально в осадовій товщі. Якщо структура осадової товщі 2-х- або 3-х-мірна, тобто є горизонтальні неоднорідності, наприклад, варіації потужності осадових басейнів, резонансні явища також спостерігаються для поверхневих хвиль, що розвиваються на таких неоднорідностях [Bard, 1995]. Підсилення без зміни тривалості і частотного складу коливань, відбувається в градієнтних середовищах без різких сейсмічних кордонів, що підтверджують записи землетрусу 1987 року в Нортриджі (США). У ґрунтових товщах з контрастними сейсмічними межами спостерігаються резонансні ефекти. Яскраві прояви резонансних ефектів в приповерхневих ґрунтових шарах відзначені при землетрусах 1985 р. в Мехіко (Мексика, $M = 8.1$) і 1988 р. в Спітаку (Вірменія, $M = 7.0$) [Айзенберг, 1989].

Розглянемо також, механізми пов'язані з відбиттям хвиль. На рис. 4.3.а схематично показаний один період хвилі, фронт якої проходить тільки через поверхню землі. Якби границі не було, падаюча хвиля поширювалася би без будь-яких змін, як показано пунктирною лінією. Оскільки поверхня землі працює як вільна поверхня, хвиля відбивається дзеркально симетрично щодо границі, як показано пунктирною лінією.

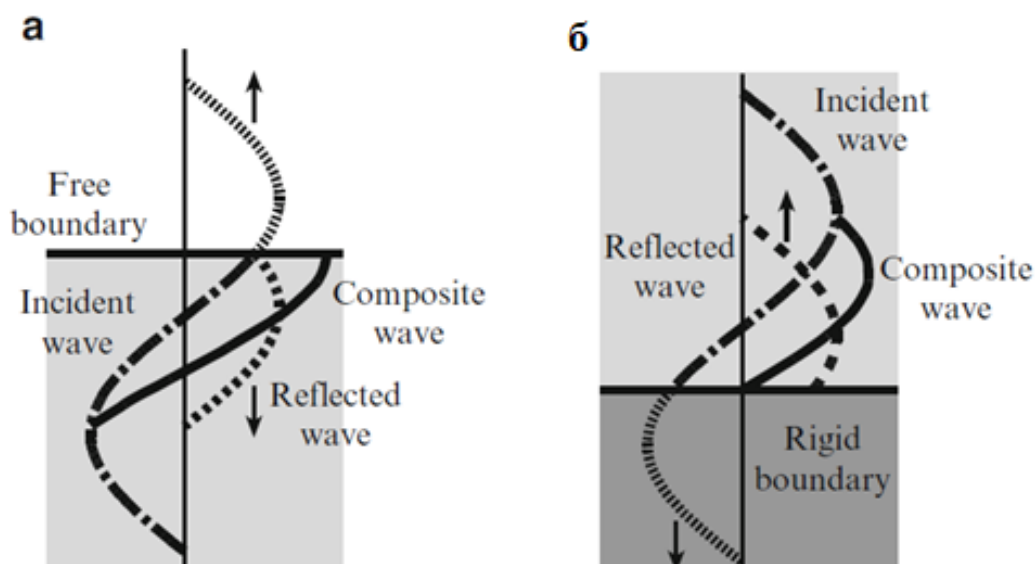


Рис. 4.3 Відбиття хвилі від поверхні ґрунтової товщі і від основи: відбиття на вільній границі (а); відбиття на фіксованій границі (б)

Тому складова хвиля (суцільна лінія) – сума падаючої і відбитої хвиль, стає більше падаючою хвилею. Хвиля землетрусу підсилюється вдвічі, коли вона відбивається від поверхні ґрунтової товщі. Фази падаючої і відбитої хвиль ідентичні на поверхні ґрунтової товщі, але виникає фазова затримка в шарах, розташованих нижче. Відповідно, підсилення стає меншим в міру збільшення глибини. Якщо на поверхні ґрунтової товщі є споруда, відбиття, яке призводить до подвійної амплітуди, не відбувається. Відповідно, в аналізі сейсмічної реакції споруди не раціонально використовувати сейсмічне коливання на вільній поверхні в якості вхідного в споруду, оскільки амплітуда коливання на поверхні ґрунтової товщі більша, ніж амплітуда коливання яка потрапляє споруду. Це одна з причин, по якій при проектуванні сейсмостійкої споруди необхідно враховувати взаємодію «ґрунтова основа – споруда». Хвиля, відбита від поверхні ґрунтової товщі, знову відбивається на границях розділу між шарами, що залягають нижче. На відміну від повного відбиття від поверхні ґрунтової товщі, на границях розділу між шарами хвиля відбивається частково. Тобто деяка частина енергії передається, а інша відбивається на міжфазній

границі шарів. Співвідношення поширюваних і відбитих хвиль регулюється співвідношення жорсткостей ($\alpha = \rho V$) двох граничних шарів.

Коли хвиля поширюється від шару з жорсткістю α_i до шару з жорсткістю α_0 , коефіцієнт відображення R і проникність T розраховуються як

$$R = \left(\frac{\alpha_i - \alpha_0}{\alpha_i + \alpha_0} \right)^2, \quad T = \frac{4\alpha_i\alpha_0}{(\alpha_i + \alpha_0)^2}.$$

В однорідному середовищі $\alpha_i = \alpha_0$, $R=0$ і $T=1$, що вказує на відсутність відбиття. У міру збільшення α_0 відбивається більше хвиль. Всі хвилі відбиваються, коли $\alpha_0 = \infty$ відповідає $R=1$ і $T=0$.

Цей тип границі називається фіксованою границею і вважається жорсткою основою при аналізі поширення сейсмічних хвиль.

Поведінка хвилі в ґрунтовій товщі з жорсткою основою схематично представлена на рис. 4.3.б. Хвиля відбивається з різницею фаз 180° і з точковою симетрією. Потім зміщення на границі стає рівним нулю, що є однією з причин, чому ми використовуємо відносне зміщення щодо основи в теорії сейсмічних коливань.

Відбита від нижчих шарів хвиля повертається на поверхню ґрунтової товщі. Енергія коливання накопичується і поглинається багаторазовими відбиттями між поверхнею і нижчого рівня шарами. Отже, збільшується як амплітуда, так і тривалість сейсмічного коливання.

Інструментальні спостереження за сейсмічними коливаннями ґрунту вказують на той факт, що ґрунтова товща послаблює сейсмічну енергію на високих частотах [Павленко, 2020; Voore, 1983]. Згасання енергії сейсмічної хвилі зумовлене трьома основними факторами: геометричним розходженням (обумовленим зменшенням питомої енергії на одиницю площі фронту хвилі, в зв'язку з її збільшенням в міру віддалення від джерела); розсіюванням на неоднорідностях середовища та непружним поглинанням, або власним згасанням (обумовленим втратами енергії на пластичні, нелінійно-пружні деформації і теплові втрати). Згасання енергії на високих частотах є одним з

найголовніших факторів, що контролює зменшення амплітуди і деформує форму спектра.

Спостережені дані останніх руйнівних землетрусів підтверджують факт, що підсилення коливань ґрунту є більш вираженим при слабких сейсмічних впливах, ніж при сильних через розглянуті вище механізми перетворення сейсмічних хвиль в шаруватих ґрунтових товщах. Найбільші підсилення при землетрусах в Лома-Пріета (1989 р.) та Мічоакан (1985 р.) були зафіксовані на значній відстані від епіцентру, де амплітуда сейсмічних хвиль, як правило, є меншою через ефекти розходження і згасання. В роботі [Darragh and Shakal, 1991] порівнюються сейсмічні коливання ділянок складених м'якими і твердими ґрунтами при сильних та слабких сейсмічних впливах. Більші підсилення були зафіксовані на ділянках складених м'якими ґрунтами, ніж твердими, особливо при слабких сейсмічних впливах. Крім того, виходячи з амплітудних спектрів Фур'є, ділянки з м'якими ґрунтами підсилювали сейсмічні коливання з коефіцієнтами підсилення від 12 до 25 з періодом коливання 1 сек, у порівнянні з ділянками складеними твердими породами при слабких сейсмічних коливаннях. Підсилення сейсмічних коливань при сильних сейсмічними впливах було в 3 рази більшим на ділянках з м'якими ґрунтами, ніж на ділянках з твердими породами [Darragh and Shakal, 1991]. Ділянки складені твердими ґрунтами підсилювали сейсмічні коливання у 2 або 3 рази як при сильних, так і при слабких сейсмічних впливах. Дослідження показали, що підсилення сейсмічних коливань ґрунтами на порівнянних епіцентральної відстанях, як правило, є вищим при землетрусах меншої величини або в більш низько швидкісних ґрунтах, що пояснюється їх нелінійною поведінкою [Darragh and Shakal, 1991]. Нелінійна поведінка ґрунту сильніше проявляється при інтенсивних сейсмічних впливах і в низько швидкісних ґрунтах.

4.1.1. Приклади підсилення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами

Відомо, що пошкодження внаслідок землетрусу більші на ділянках складених м'якими ґрунтами. Це свідчить про те, що сейсмічні коливання інтенсивніші в м'якому ґрунті і є прикладом підсилення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами. Чіткі докази дають дослідження наслідків минулих землетрусів. На рис. 4.3 показані ізолінії пікового прискорення, зареєстровані під час землетрусу в Тотторікен-Сейбу 2000 року в Японії. Оскільки сейсмографи встановлювалися не тільки на поверхні землі, а й на великій глибині в системі KiK-net [Digital Strong-Motion..., 2010], це дозволило зобразити ізолінії максимального прискорення як на поверхні землі, так і на глибині. Згідно карт ізоліній: області з високими максимальними прискореннями розширюються на поверхні землі в порівнянні з областями на глибині, що вказує на те, що сейсмічні коливання підсилюються на поверхні.

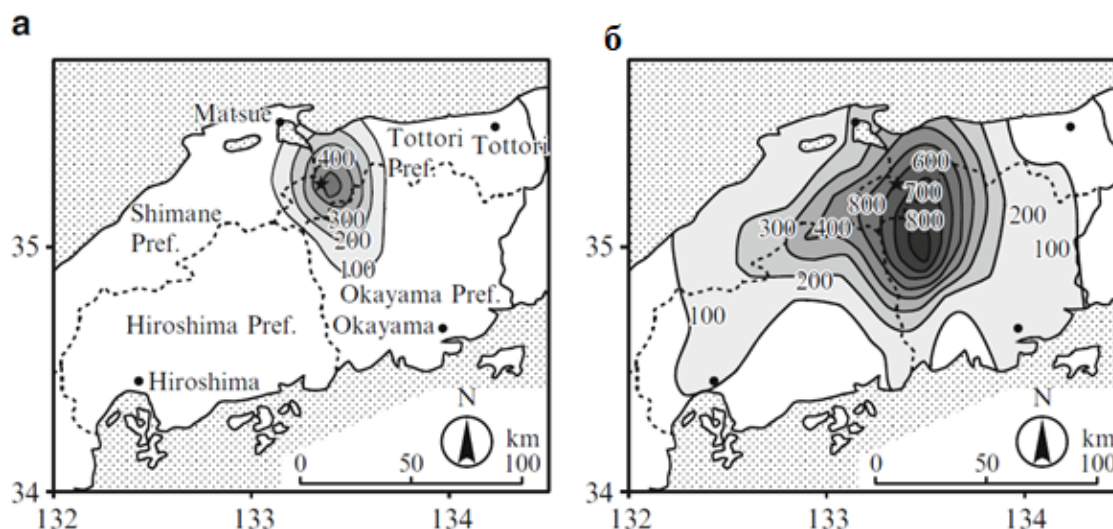


Рис. 4.4 Підсилення коливань ґрунту під час землетрусу 2000 року в Тотторікен-Сейбу, Японія, де числа вказують прискорення в cm/s^2 : зареєстровані на глибині (а); на поверхні (б) [JGS reconnaissance team, 2000]

Рис. 4.4 також ілюструє, що області, схильні до більш високих рівнів прискорення, простягаються на південь від епіцентру, оскільки розрив розлому спрямований на південь, що є хорошим прикладом спрямованості.

Більш чіткі докази підсилення м'якими місцевими ґрунтами сейсмічних коливань, яке спостерігалось під час землетрусу в Тотторікен-Сейбу, Японія 2000 р., показано на рис. 4.5 на чотирьох записах прискорення [Nozu, 2003].

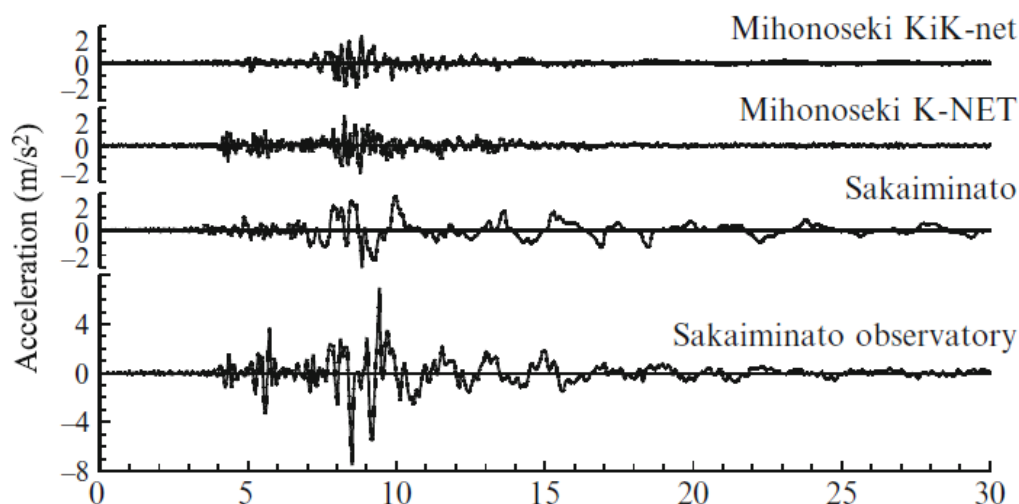


Рис. 4.5 Записи землетрусу Тотторікен-сейбу 2000 р. станціями поблизу Сакаймінато (Японія) [Nozu, 2003]

Чотири станції розташовані практично на однаковій довготі, а відстань між станціями складає максимум 20 км. Однак графіки акселерограм сильно відрізняються один від одного, особливо записи Сакай-Мінато і обсерваторії Сакай-Мінато, хоча відстань цими двома станціями складає всього 1,2 км.

Станції Сакай-Мінато і обсерваторія Сакай-Мінато розташовані на поверхневих відкладах, товщина яких коливається до 900 м, в той час як дві інші станції розташовані в гірській місцевості.

На рис. 4.6 (а) показано зареєстроване пікове прискорення ґрунту (PGA) в Сан-Франциско під час землетрусу в Лома-Прієта 1989 р. Видно, що PGA, зареєстроване на голоценових відкладах приблизно вдвічі перевищує PGA, зареєстроване на оголених скельних відкладах [Tokyo Prefecture, 1990].

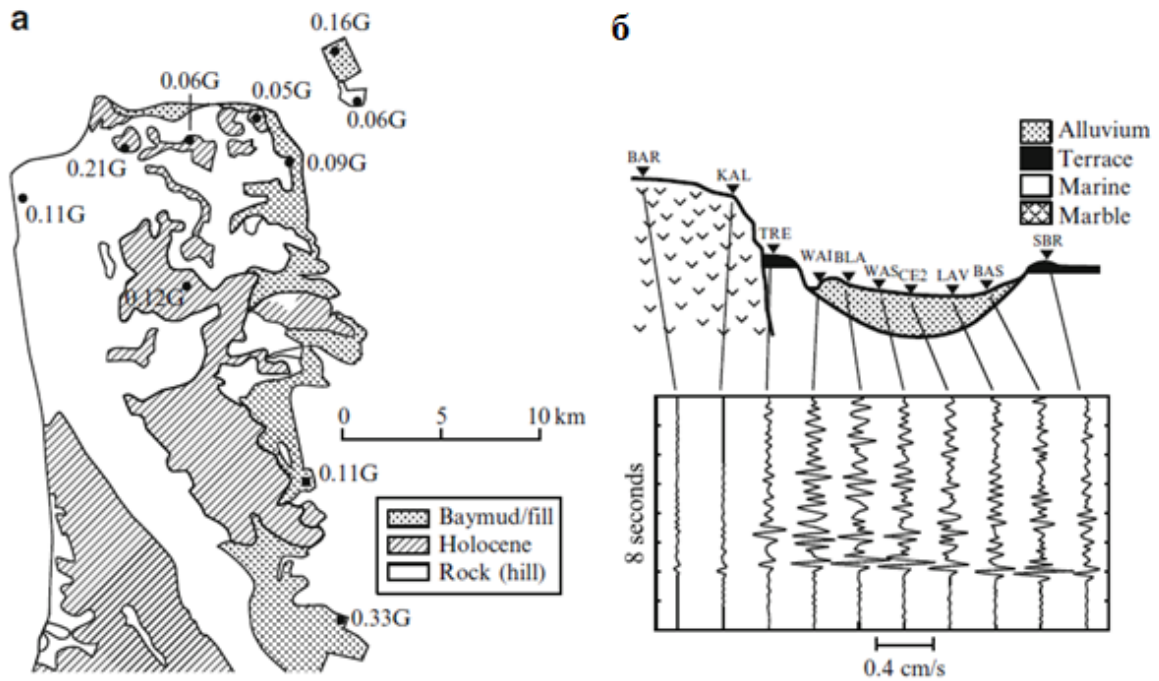


Рис. 4.6 Спостережені дані землетрусу в Лома-Прієті 1989 року: PGA при головному поштовху (а) [Токуо Prefecture 1990] ; записи афтершоку (б) [Kameda 1990].

На рис. 4.6 (б) показано записи спостережених афтершоків Геологічної служби США [Kameda 1990]. Видно, що підсилення сейсмічних коливань руху незначне на ділянках складених мармуровими скельними породами, які характеризуються високими значеннями акустичної жорсткості. Одночасно спостерігається значне підсилення в м'яких алювіальних (голоценових) відкладах. Також видно, що тривалість сейсмічних коливань в м'якому ґрунті більша, ніж на ділянці складеної мармуровими скельними породами, через множинних відбиття від основи. Сейсмічні коливання на терасі характеризуються середніми значеннями.

4.1.2. Послаблення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами

Зареєстровані підсилення приповерхневими відкладами розглядаються в попередньому підрозділі, нижче розглянемо протилежний механізм трансформації сейсмічних коливань в ґрунтах.

На рис. 4.7 показані залежності між прискореннями на ділянках складених розуцільненими м'якими ґрунтами і прискореннями на ділянках складених скельними ґрунтами [Idriss,1990].

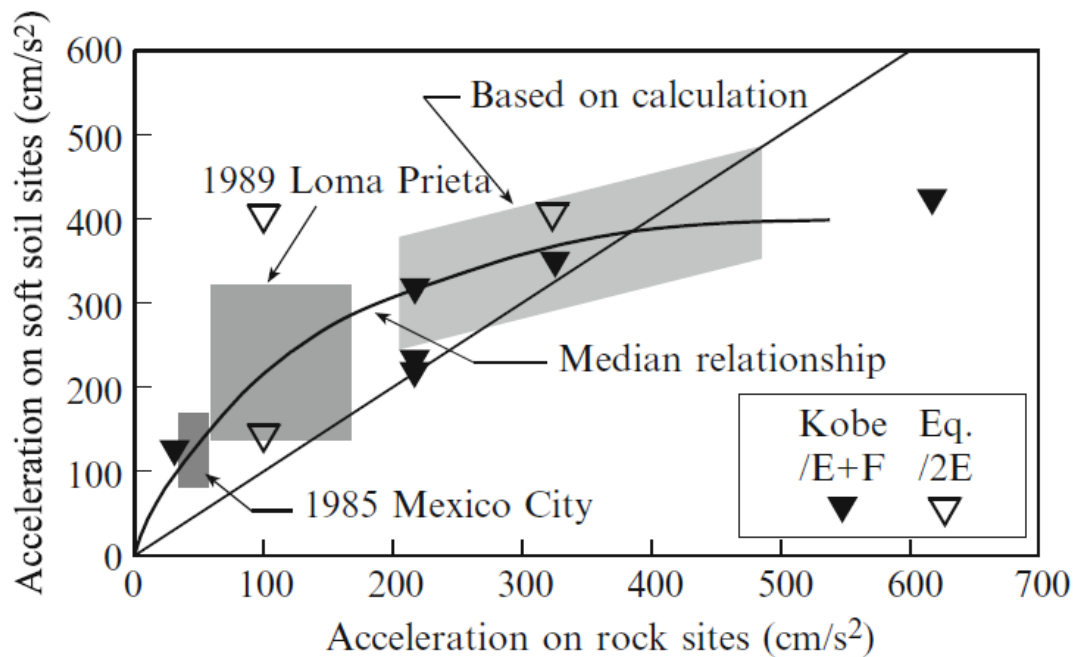


Рис. 4.7 Зміна характеристик підсилення, пов'язаних з нелінійною поведінкою ґрунту

На момент створення зображення, представленого на рис. 4.1 були доступні зареєстровані записи двох землетрусів: Лома Пріета 1989 р. США і Мічоакан 1985 р. Мексика. По обох акселерограмам було встановлено, що прискорення підсилювалися на поверхні по відношенню до корінних порід. Оскільки записи про інтенсивні коливання ґрунту були обмежені, дані були доповнені чисельним аналізом, і було виявлено, що прискорення на м'якому ґрунті були меншими, ніж на скельній ділянці за межами частини інтенсивного коливання. Автори додали дані, записані під час землетрусу в Кобе в 1995 р.

[Suetomi and Yoshida, 1998, Yoshida et al., 2005], які відзначені на рис.4.1 відповідними позначками. Ці нові дані показують послаблення на м'якому ґрунті під час інтенсивних коливань.

На рис. 4.8 (а) показані максимальні сейсмічні реакції ґрунту на острові Порт, оцінені чисельним аналізом [Kobe City..., 1995]. Хоча розрідження було великою проблемою на цій ділянці, так як розрідження спостерігалось майже на всіх островах, розглядається поведінка м'якого шару глини під насипним шаром.

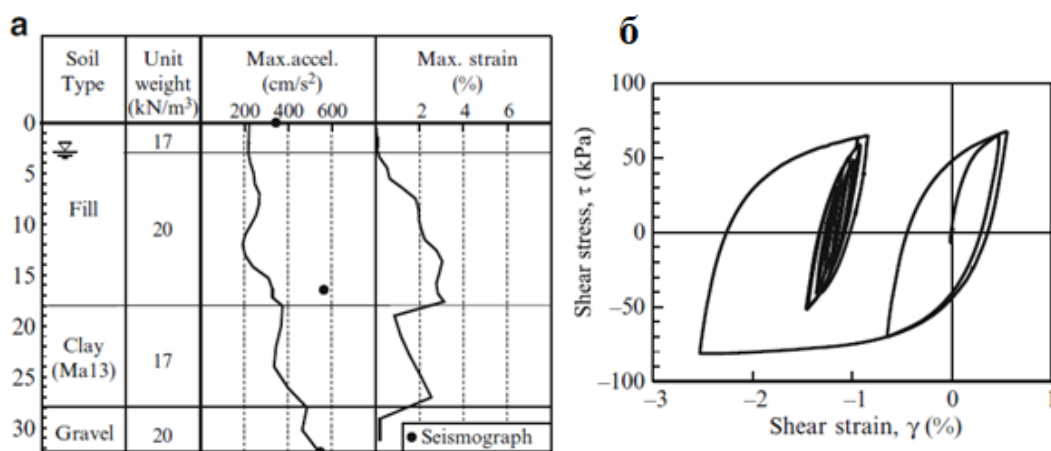


Рис. 4.8 Результати чисельного аналізу сейсмічної реакції ґрунтового розрізу ділянки на острові Порт [Yoshida, 1995]

З рис. 4.8 видно, що максимальне прискорення зменшується від більш глибоких шарів до поверхні землі, що є протилежним підсиленню, описаному в попередньому підрозділі. Максимальне прискорення значно зменшується на глибині 28 м на границі між шаром голоценової глини і шаром гравію під ним. На рис. 4.8 (б) представлена крива напруження-деформація в основі голоценового шару глини. Максимальна деформація досягає приблизно 2,5%, і крива залежності напруження-деформація має область плато на цьому рівні деформації. Це вказує на те, що напруження наближається до межі міцності на зсув.

Розглянемо одновимірний стовпчик ґрунту, зображений на рис. 4.9.

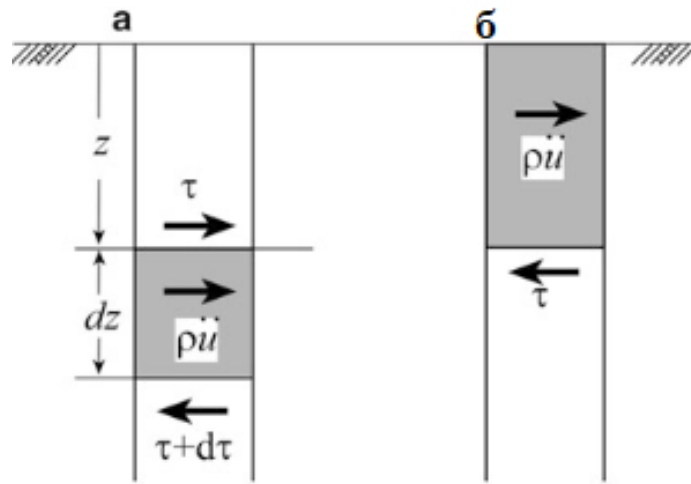


Рис. 4.9 Рівновага одновимірного стовпчика ґрунту; нескінченно малий елемент (а), область вище глибини z (б).

Напруження і сили, що діють на нескінченно малу область, показані на рис. 4.9 (а). Рівновага цього елемента призводить до

$$d\tau = \rho dz \ddot{u} \quad \text{або} \quad \frac{d\tau}{dz} = \rho \ddot{u}, \quad (4.1)$$

де τ – зсувне напруження, ρ - щільність, \ddot{u} – прискорення, z – глибина. З іншого боку, на рис. 4.9 (б) показані напруження і сила, що діють на тіло вище глибини z , і умова рівноваги записується як

$$\tau = \int_0^z \rho \ddot{u} dz \approx \int_0^z \rho dz \ddot{u}_{ave} = \frac{\sigma_v u_{ave}}{g} \quad (4.2)$$

або

$$\ddot{u}_{ave} = \frac{\tau}{\rho z} = \frac{\tau g}{\sigma_v}, \quad (4.3)$$

де \ddot{u}_{ave} - середнє прискорення вище глибини z , g - прискорення вільного падіння, а σ_v – напруження покриваючої породи. Якщо зсувне напруження сягає міцності на зсув τ_f , відповідне прискорення \ddot{u}_{ult} запишемо, як

$$\ddot{u}_{ave} = \frac{\tau_f g}{\sigma_v}. \quad (4.4)$$

Оскільки права частина цього рівняння є максимально допустимим значенням, середнє прискорення в лівій частині також є максимально допустимим значенням. В реальній ситуації, оскільки \ddot{u}_{ult} - це середнє значення від 0 до z по глибині, прискорення може стати трохи більшим, ніж \ddot{u}_{ult} через розсіювання в вертикальному напрямку, проте абсолютне значення контролюється майже в усіх випадках. Це прискорення називають прискоренням верхньої межі [Yoshida, 2015].

Рівняння (4.4) показує, що прискорення верхньої межі залежить від напруження покриваючої породи і міцності на зсув. Воно стає меншим в міру зменшення міцності на зсув або зі збільшенням глибини слабкого шару. Рівняння (4.4) також показує існування прискорення верхньої межі, що є причиною послаблення сейсмічного коливання.

Виникає цікавість, як в такому випадку зміняться інші індекси коливання ґрунту. Конкретний приклад приводиться для ґрунтового профіля потужністю 10 м, який характеризується швидкістю поперечної хвилі 100 м/с і кутом внутрішнього тертя 30° в роботі [Yoshida, 2015]. На рис. 4.10. представлені п'ять показників: максимальне прискорення, максимальна швидкість, максимальне зміщення, спектральна інтенсивність (значення SI, яке прийнято в Японії відрізняється від оригінального визначення, запропонованого [Housner, 1965], воно ділиться на 2,4 так, щоб розмірність значення SI була такою ж, як і у швидкості) та інструментальна сейсмічна інтенсивність JMA [Kinoshita and Ohtake, 2000] відкладені по ординаті, а максимальне прискорення вхідного руху показано на абсцисі.

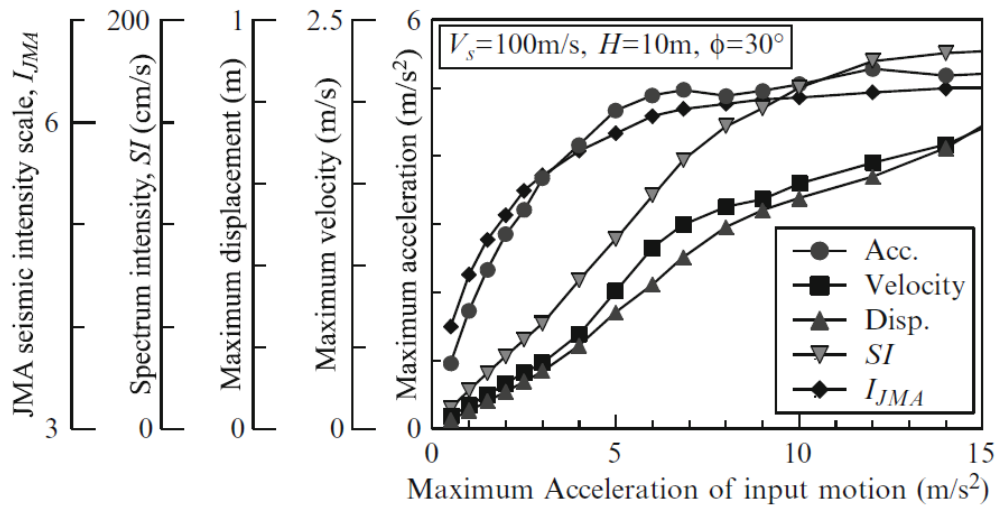


Рис. 4.10 Порівняння максимального прискорення з іншими показниками [Yoshida, 1999]

З рис. 4.10 видно, що максимальне прискорення і сейсмічна інтенсивність JMA мають чітку верхню межу. Значення SI також показує верхню межу, хоча вона з'являється пізніше.

Вважається, що значення SI і максимальна швидкість мають схожі характеристики, а інструментальна сейсмічна інтенсивність JMA є середньою величиною між прискоренням і швидкістю [Yoshida, 2015]. Тоді значення SI і сейсмічна інтенсивність JMA не повинні мати верхню межу, однак результат аналізу показує інші особливості.

Відмічаються суттєві відмінності у визначенні значення SI і сейсмічної інтенсивності JMA від визначення швидкості відносно частотного діапазону. Значення SI враховує діапазон періоду від 0,1 до 2,5 с або діапазон частот від 0,4 до 10 Гц. Сейсмічна інтенсивність JMA розраховується для періодів від 0,1 до 2с або частот від 0,5 до 10 Гц. Отже, хвилі з більш довгим періодом, викликані нелінійною поведінкою, не враховуються, якщо їх період перевищує найдовший період у визначенні. Сейсмічна інтенсивність JMA досягає верхньої межі раніше, ніж значення SI, оскільки вона враховує менший період, ніж значення SI. Механізми верхньої межі для цих показників інші, ніж для максимального прискорення. Компоненти з більш довгим періодом не впливає

на пошкодження конструкцій; проте все вказує на те, що пошкодження також має верхню межу в залежності від нелінійної поведінки ґрунту. Типовий приклад, який показує існування верхньої межі, спостерігався під час землетрусу в Кобе в 1995 р. [Suetomi and Yoshida 1998].

На рис.4.11 показаний поперечний розріз, що проходить через залізничну станцію Санномія, отриманий інженерно-вишукувальними роботами [Suetomi and Yoshida 1998].

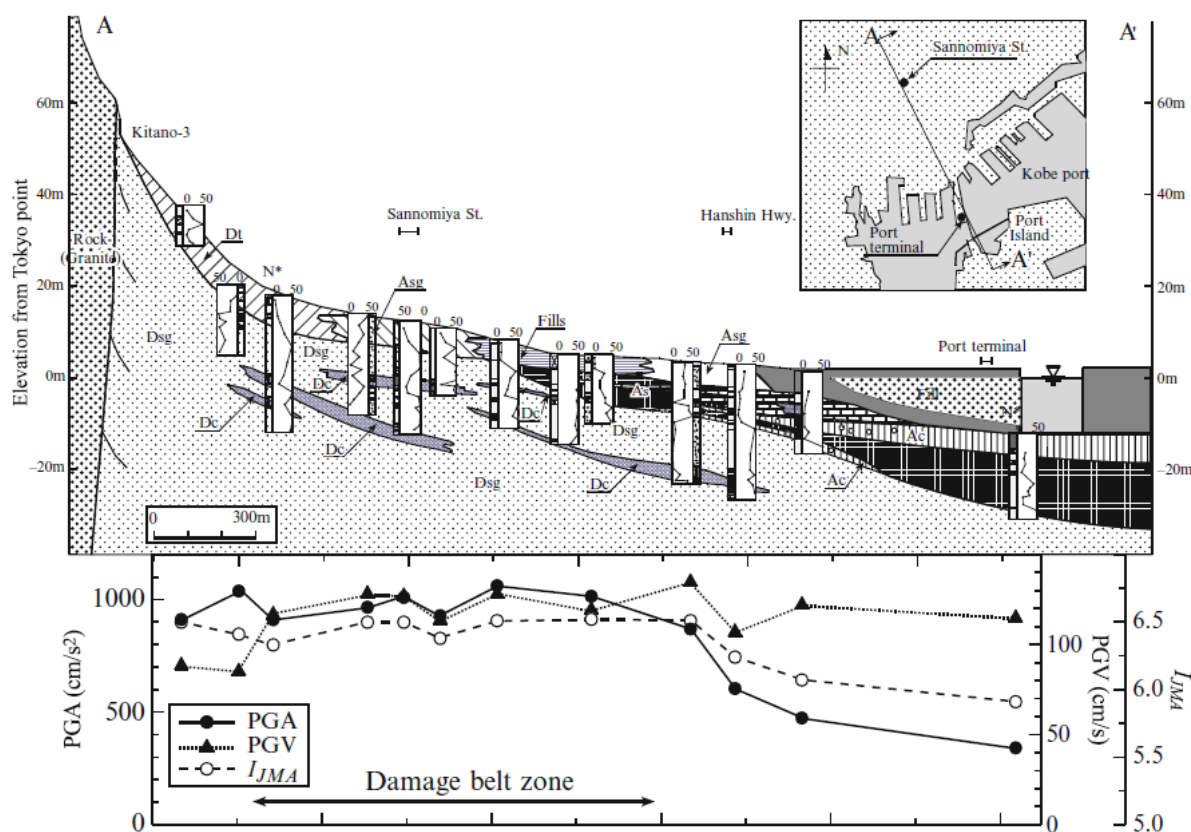


Рис. 4.11 Ґрунтовий розріз профілю та показники сейсмічного коливання вздовж профілю [Suetomi and Yoshida, 1998]

На основі даних ґрунтового розрізу профілю, представленого на рис. 4.11 було проведено безліч чисельних аналізів сейсмічної реакції. Крім того, показники сейсмічного коливання, такі як пікове прискорення, швидкість та сейсмічна інтенсивність JMA, були оцінені на основі хронології прискорення, записаної на вільній поверхні. Сейсмічна інтенсивність JMA на рис. 4.11

розрахована з використанням тільки односпрямованої складової, хоча у вихідному визначенні вона повинна розраховуватися на основі трьох складових. Отже, це значення менше фактичної сейсмічної інтенсивності, але це не впливає результати представлені в розділі. Показники коливання ґрунту на рис. 4.11 показані в нижній частині розріза. Зона пояса ушкоджень (damage belt zone) - це ділянка, де пошкодження будівель і дерев'яних будинків є найбільш значною; частка зруйнованих будинків досягла декількох десятків відсотків, а іноді і більше 90%. На півдні зони пояса ушкоджень сейсмічна інтенсивність, а також прискорення швидко знижуються, спостерігається і значне зменшення частки зруйнованих будинків. Однак також відзначається, що і в цьому випадку не спостерігається зменшення швидкості. З точки зору аналізу, зменшення прискорення пов'язане з наявністю в розрізі шару голоценової глини, показаного на малюнку умовним позначенням, як Ас. Такий же шар голоценової глини є і в розрізі на рис. 4.8 (Ma13). Таким чином, південна межа зони пошкодженого пояса контролюється шаром м'якої глини голоцену. Фактично, також повідомляється, що цей шар глини голоцену невиявлений під зоною пояса ушкоджень [Yoshida, 2015].

4.2. Вплив тонких шарів на трансформацію сейсмічних коливань

Тонкі шари діють на спектральний склад сейсмічних хвиль аналогічно частотним фільтрам різних типів: смугового, режекторного, високих або низьких частот - в залежності від типу хвилі і будови самих тонких шарів [Вознесенский, 1999]. Під тонким будемо розуміти шар, потужність якого не перевищує двох довжин хвилі, що поширюється в ньому. У середовищі, що складається з декількох тонких шарів, завдяки спільній дії поглинання і тонкої шаруватості спектри поширюваних і відбитих хвиль можуть значно відрізнятися від спектра падаючої хвилі. Тонкий шар може, наприклад, пропускати коливання тільки полоси частот, близької до його власної в хвилі даного типу [Берзон и др., 1962], викликаючи резонансне підсилення коливань поверхні ґрунтової товщі. Результатом такого підсилення сейсмічних коливань,

наприклад, були значні руйнування в ряді районів Сан-Франциско під час Каліфорнійського землетрусу Лома Прієта 17 жовтня 1987 р. Було зафіксовано 6-10-кратне збільшення амплітуд коливань на поверхні молодих глинистих ґрунтів у порівнянні зі скельною основою для періодів близько 1с і 2-3-кратне - для періодів 0,2-0,3 с [Boatwright et al., 1992].

Наявність в ґрунтах різних границь і неоднорідностей може обумовлювати також залежність швидкості поширення хвилі від її частоти - дисперсію швидкості. Це призводить до спотворення форми хвилі, що поширюється, оскільки її більш високочастотні компоненти (що поширюються незалежно, відповідно до принципу суперпозиції) відстають від низькочастотних (нормальна дисперсія) або навпаки, випереджають їх (аномальна дисперсія). При цьому форма хвилі з вузьким спектром змінюється, але форма обвідної залишається без змін і переміщається з груповою швидкістю. При поширенні широкополосного коливання змінює форму і обвідна [Вознесенский, 1999; Ультразвук, 1979].

Найбільш точний метод оцінки фільтруючих властивостей ґрунтів заснований на визначенні їх частотної характеристики, яка, в свою чергу, є комплексною функцією частоти і має дійсну та уявну частини [Вознесенский, 1999; Amini et al., 1988]. Частотна характеристика може бути отримана зі співвідношення між енергетичними спектрами впливу $S_{FF}(\omega)$ і реакції на нього $S_{xx}(\omega)$ [Crandall, Mark, 1963]:

$$S_{xx}(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{FF}(\omega),$$

де $|H(\omega)|$ - амплітуда частотної характеристики.

Метод частотної характеристики дозволяє визначати власні частоти коливань системи «ґрунт - споруда» і згасання в ній або способом пікових амплітуд, або за дійсною частиною цієї функції, або ж по так званому графіку Найквіста [Ewins, 1984; Amini, 1990].

Отже, ґрунти як природні багатокомпонентні системи є досить специфічним середовищем для поширення сейсмічних хвиль: вони змінюють не тільки динамічні характеристики цих хвиль (або до повного поглинання або

перетворення типу хвилі), а й свої властивості, причому ці процеси невіддільні одне від одного [Вознесенский, 1999].

В [Берзон и др., 1962] відмічається, що подальше вивчення впливу шаруватості на особливості форми і амплітуди хвиль, що поширюються в тонкошаруватих середовищах, повинно базуватись на аналізі масових розрахунків сейсмічної реакції ґрунтових товщ на сейсмічні навантаження.

4.3. Дослідження впливу зміни вологості моделей реальних ґрунтових товщ на сейсмічний ефект

Серед основних параметрів фізико-механічних властивостей ґрунту, які впливають на сейсмічний ефект на поверхні, велику роль відіграють ступінь і характер вологості ґрунту. Цей вплив особливо помітний для рихлих відкладів, які характеризуються великими значеннями пористості, і відповідно, можливістю в більшій мірі водонасичуватись [Вознесенскийи др., 2014]. Саме такі ґрунти, останнім часом все частіше зустрічаються в розрізах ґрунтових товщ будівельних майданчиків Києва, оскільки кращі ґрунтові умови вже забудовані.

На рис. 4.12 представлено приклад розрахованих частотних характеристик ґрунтової товщі території Бортницької станції аерації з різними показниками вологості суглинків, що зустрічаються в ґрунтовому розрізі.

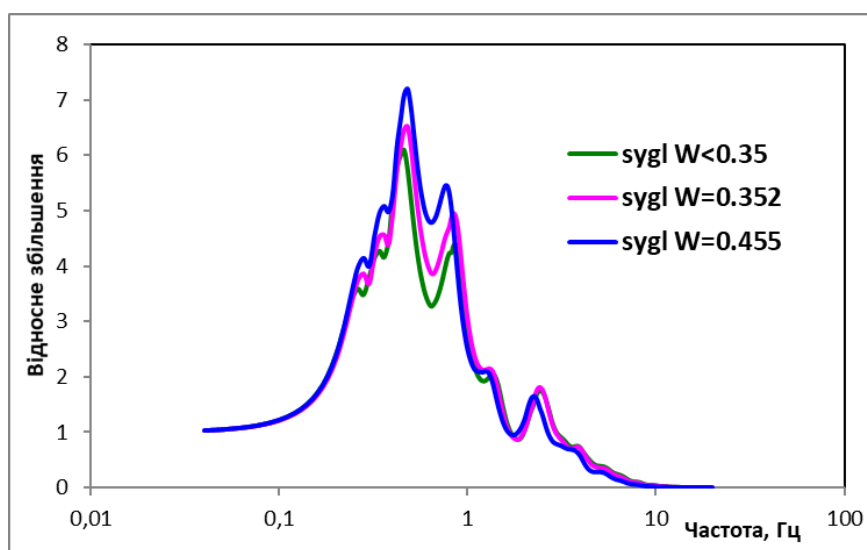


Рис. 4.12 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі складених суглинками різної вологості (територія Бортницької станції аерації)

В глинистих ґрунтах, окрім вільної води, ще є зв'язна вода, яка покриває окремі частинки. При зволоженні ґрунту плівки зв'язної води потовщуються, відстань між частинками збільшується, ґрунт набухає і переходить з твердого стану (твердої консистенції) в пластичний (тістоподібний), а потім і в текучий, тобто набуває властивості в'язкої рідини [Механіка ґрунтов..., 2015]. Такі переходи супроводжуються різким падінням несучої здатності ґрунту. На рис. 4.12 такі явища проявляються в розширенні спектральної області підсилення коливань і зміщенні резонансних частот. Відмітимо, що на рис. 4.12 представлено частотні характеристики ґрунтової товщі складеної суглинками зі змінною вологістю, які зустрічаються в інженерно-геологічному розрізі території Бортницької станції аерації. При збільшенні показників вологості ґрунту, зміна параметрів частотної характеристика буде також збільшуватись.

На рис. 4.13 представлено розраховані частотні характеристики ґрунтової товщі території Бортницької станції аерації з різними показниками вологості пісків, що зустрічаються в розрізі.

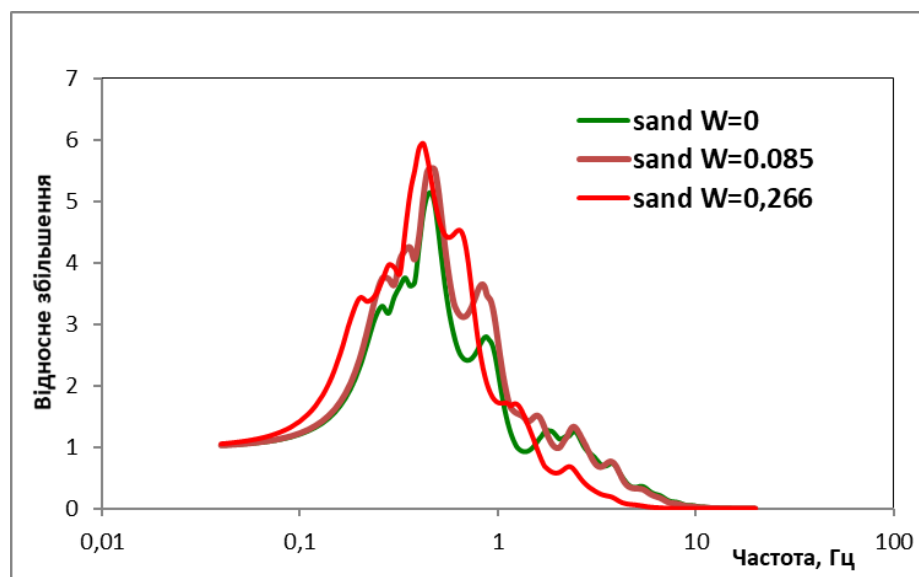


Рис. 4.13 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі складених пісками різної вологості (територія Бортницької станції аерації)

З рис. 4.12 та рис. 4.13 видно, що зі збільшенням вологості ґрунту, як у випадку суглинків (рис. 4.12) так і піску (рис. 4.13) збільшується коефіцієнт підсилення сейсмічних коливань ґрунтами.

Несуча здатність піску зменшується, сейсмічні властивості погіршуються зі збільшенням вологості, і вплив вологості на таку динаміку збільшується зі зменшенням крупності піску.

Таким чином, збільшення вологості прискорює зниження міцності ґрунту при сейсмічному навантаженні. Це пояснюється послабленням структурних зв'язків і збільшенням рухливості частинок в міру потовщення їх гідратних оболонок, а отже – і зменшенням згасання коливань в ґрунті при підвищенні його вологості до критичного рівня, вище якого вихідна міцність системи, що знаходиться вже в текучопластичній або, навіть, скритнотекучій консистенції, різко падає, що і призводить до зниження відносного розуцільнення. Величина вологості максимального розуцільнення практично не залежить від параметрів сейсмічного навантаження і визначається фізико-хімічною активністю ґрунту [Вознесенский, 1990].

Слід відмітити, що в вологих ґрунтах класичне поглинання обумовлено трьома механізмами, однак їх вклад коливається. При наявності в ґрунті неоднорідностей (в тому числі пов'язаних зі збільшенням вологості), розмір яких в декілька десятків або, навіть, сотень разів менший довжини хвилі, хвиля в результаті розсіюється. Амплітуда утворених розсіяних хвиль прямо пропорційна квадрату частоти хвилі [Берзон та ін., 1962]. Відповідно, спектр хвилі на таких неоднорідностях через розсіювання високочастотних компонент стає більш низькочастотним.

4.5. Вплив ущільнення (консолідації) намивного та насипного піску на сейсмічну реакцію при динамічному навантаженні

В розділі представлено результати дослідження впливу ущільнення намивного та насипного піску з часом на сейсмічні показники ґрунтової товщі в основі будівельного майданчика. Намивні та насипні ґрунти відносяться до

техногенних ґрунтів і широко використовуються в якості основи для будівель і споруд. Вплив фактору часу на стан таких ґрунтів формує процес ущільнення і зміцнення за рахунок зменшення пор в результаті переупаковки мінеральних частинок, а також їх взаємного переміщення. Процес деформації ускладнений через наявність сил зчеплення між окремими мінеральними частинками і наявності в порах ґрунту води, яка взаємодіє з цими частинками.

Відомо, що найбільш низькі значення швидкостей розповсюдження повздовжніх і поперечних хвиль спостерігаються у свіжонамивних пісках (<0.5 років), які практично не володіють структурною зв'язаністю або у деяких ця зв'язаність є слабкою. У таких ґрунтів швидкість поширення повздовжніх хвиль V_p , як правило, не перевищує 150 м/с. З часом намивні ґрунти ущільнюються, в них відбувається ріст і зміцнення структурних зв'язків, в результаті чого значно зростають швидкості сейсмічних хвиль. Це підтверджують дослідження, що проводились раніше на інших ділянках [Сеськов, 2013]. Явище зростання швидкості пружних хвиль в подібних ґрунтах пояснюється їх ущільненням і зміцненням у часі (утворюються кремнеземисті зв'язки між піщаними частками і глинистими прошарками, які залежать від технології намиву), що підтвердилось результатами дослідів ґрунтів статичним навантаженням в вертикальній і горизонтальній площинах та зондуванням [Сеськов, 2013].

Рис. 4.14 демонструє залежність модуля пружності E від коефіцієнта ущільнення K_u піщаних ґрунтів різної щільності.

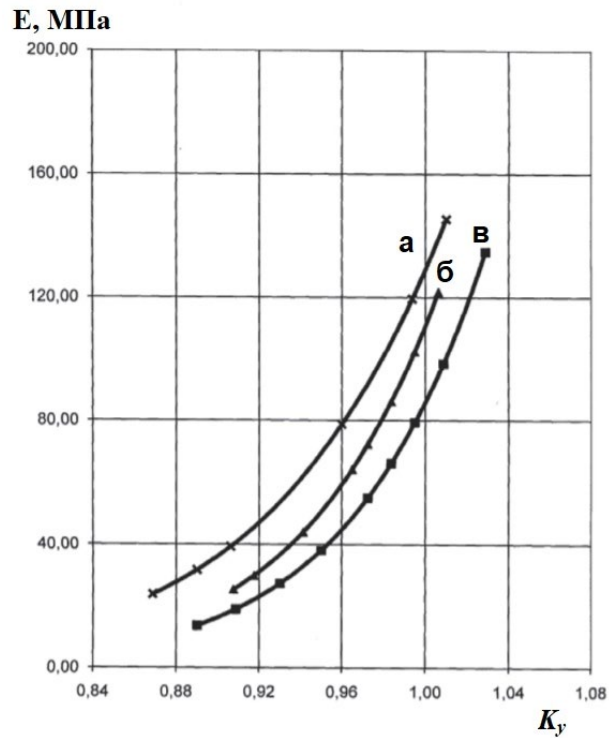


Рис. 4.14 Залежність модуля пружності E від коефіцієнта ущільнення K_y піщаних ґрунтів: щільного піску (а), пуску середньої щільності (б), мілкого піску по [Сеськов, 2013] (в).

На рис. 4.15 показано залежність між швидкістю поздовжньої хвилі V_p , і умовним динамічним опором P_D для насипних пісків незалежно від щільності

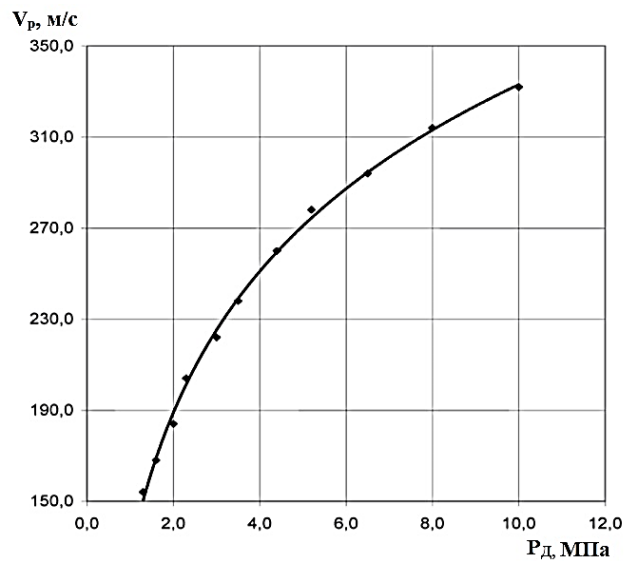


Рис. 4.15 Залежність між швидкістю поздовжньої хвилі V_p , і умовним динамічним опором P_D для насипних пісків незалежно від щільності.

Встановлення залежностей між механічними характеристиками і геофізичними (швидкості пружних хвиль) дозволяє перейти від лабораторних досліджень до теоретичного аналізу конкретних ґрунтових умов з подальшим співставленням лабораторних і експериментальних даних з розрахунковими, або при необхідності дозволяє коригувати теоретичні залежності в відповідності з результатами експерименту.

В таблиці 4.1 наведена зміна швидкості поздовжніх та поперечних хвиль в ущільненому з часом піску.

Таблиця 4.1

Швидкість поширення в наливних пісках поздовжніх і поперечних хвиль

Давність наливу, t	V_p , м/с	V_s , м/с	E , МПа
2 місяці	250	140	10-12
5 років	320	190	25-28
10 років	450	260	30-35
25 років	700	430	

На першому етапі дослідження були перераховані наявні значення швидкостей поперечних хвиль для пісків, які складають модель ґрунтового середовища під будівельним майданчиком за адресою: вул. Березняківська, 30 в Дніпровському районі м. Києва на значення швидкостей для пісків з давністю наливу 10 років та 25 років. Розраховані значення наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Зміна швидкості поперечних хвиль з плином часу в інтервалі 10 та 25 років для будівельного майданчика за адресою: вул. Березняківська, 30 в Дніпровському районі м. Києва

Літологічний склад	Інтервал глибин	Швидкість поперечних хвиль V_s , м/с

	<i>H</i> , м	На даний час	Через 10 років	Через 25 років
Насипний ґрунт: пісок дрібнозернистий, злежаний, слабо вологий з домішками будівельного сміття	0-0,8	180	335	553
Намивний ґрунт: пісок дрібнозернистий, слабо вологий, середньої щільності та щільний	0,8-5,0	260	484	798
Пісок мілкий та пісок пилюватий, середньої щільності та щільний, з лінзами пластичного супіску	5,0-27,2	240	446	736
Пісок глауконітовий мілкий, щільний, водонасичений з прошарками пластичного супіску	27,2-46	350	651	1075
Пісковик, кремнистий, мергель	46-66	340	340	340
Пісок каолінітовий водонасичений	66-86	520	520	520
Вапняк, мергель	86-180	650	650	650
Глина	180-240	920	920	920
Пісок, пісковик, алевроліт	240-295	1300	1300	1300
Граніт, діорит	295 - ∞	2800	2800	2800

З використанням розрахованих швидкостей були побудовані нові прогнозні моделі ґрунтового середовища під будівельним майданчиком за адресою: вул. Березняківська, 30 в Дніпровському районі м. Києва, які будуть відображати сейсмічні властивості ґрунтів через 10 та 25 років. З використанням змінених параметрів моделей, з урахуванням часових змін (через 10 та 25 років), були розраховані амплітудно - частотні характеристики (АЧХ) ґрунтової товщі. Розраховані частотні характеристики представлені на рис. 4.15. При розрахунках було використано програмний продукт PROSHAKE [ProShake..., 1998] та метод еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи [Kramer, 1996], оскільки в більшості випадків саме його застосування в умовах України є найбільш обґрунтованим [Кендзера,

Семенова, 2016]. Вхідними даними слугували розрахункові сейсмогеологічні моделі ґрунтової товщі.

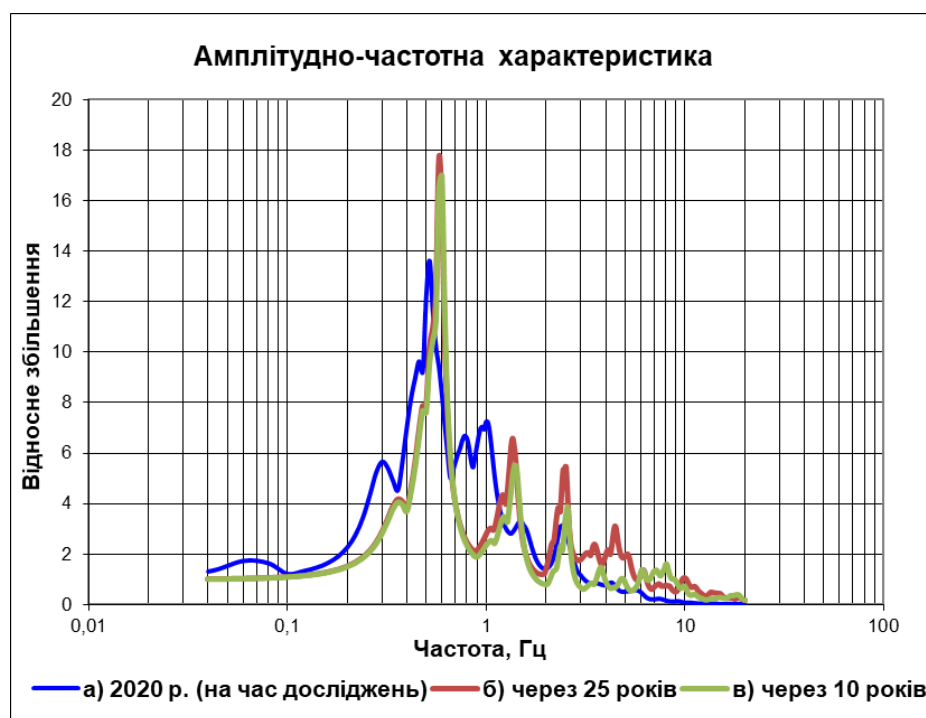


Рис. 4.15 Амплітудно-частотна характеристика ґрунтової товщі складеної намивними пісками: а) на час досліджень (2020 р.); б) з врахуванням ущільнення пісків через 25 років; в) з врахуванням ущільнення пісків через 10 років

З рис. 4.15 видно, що частотні характеристики ґрунтових товщ, складених намивними пісками різного ущільнення, у всіх трьох випадках відрізняються. У частотних характеристиках прогнозних сейсмоґрунтових моделей (через 10 та 25 років), складених ущільненими пісками, коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань збільшуються, але при цьому ширина частотного діапазону першого максимуму суттєво зменшується [Семенова, 2021a; Semenova, 2021]. Також спостерігається незначне зміщення резонансних частот в високочастотну область. Тому, в цілому, можна стверджувати, що для досліджуваного майданчика ґрунтові умови під будівництво з плином часу будуть покращуватися в сейсмічному відношенні.

Ґрунтова товща під будівельним майданчиком за адресою: вул. Березняківська, 30 в Дніпровському районі м. Києва, яка складена піщаними ґрунтами – на сьогоднішній день відноситься, згідно Таблиці 5.1 ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво в сейсмічних..., 2014] до ґрунтів III-ї категорії за сейсмічними властивостями.

Відношення швидкості поздовжніх і поперечних хвиль є важливою характеристикою речовинного (літологічного) складу, типу і фізичного стану ґрунту. Як слідує з Таблиці 5.1 ДБН В.1.1-12:2014, величина швидкості об'ємних хвиль є важливим показником, від якого залежать сейсмічні властивості ґрунтів. Якщо прийняти, що сейсмічні властивості ґрунтів, визначаються величиною швидкості об'ємних (поздовжніх та поперечних) хвиль, то відповідно до Табл. 4.2, через 25 років ґрунтову товщу під будівельним майданчиком за адресою: вул. Березняківська, 30 в Дніпровському районі м. Києва – можна буде віднести до ґрунтів II-ї категорії за сейсмічними властивостями.

Аналіз результатів, представлених на рис. 4.15 також показує, що з погіршенням сейсмічних властивостей ґрунтів підсилення амплітуди коливань зменшується. Тобто, максимальна амплітуда коливань на щільному ґрунті буде перевищувати максимальну амплітуду коливань на пухкому ґрунті. В той час як, з досвіду макросейсмічних досліджень відомо, що на пухких ґрунтах спостерігається більші пошкодження будівель. Пояснюється це тим, що під дією сейсмічних коливань ґрунт може змінювати свої властивості. Частина контактів між частинками ґрунту розривається, внаслідок чого помітно знижується міцність ґрунту і, відповідно, будівлі на таких ґрунтах можуть осідати, перекошуватися тощо. При досить сильних сейсмічних впливах такі ґрунти можуть навіть розріджуватися, тобто зовсім втрачаються зв'язки між частинками ґрунту. Зазначені явища описуються в нелінійній теорії поширення сейсмічних коливань в моделях з нелійними властивостями ґрунтів. В ґрунтах III та IV категорії за сейсмічними властивостями зміна параметрів модуля зсуву і коефіцієнта поглинання може бути більш різкою, ніж в ґрунтах I та II

категорії. Зменшення коефіцієнта підсилення коливань в слабких за сейсмічними властивостями ґрунтах, у порівнянні з ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями або скельними ґрунтами, при великих амплітудах коливань пояснюється перевагою впливу поглинання над підсиленням коливань.

Отже, результати дослідження впливу фактору ущільнення намивного піску з плином часу на амплітудно-частотну характеристику ґрунтового середовища під будівельним майданчиком показали, що ґрунтові умови під будівництво складені свіжонамивними пісками з плином часу та з ущільненням будуть покращуються в сейсмічному відношенні. Про це свідчить зменшення ширини частотного діапазону резонансного підсилення ґрунтами сейсмічних коливань та зміщення резонансних частот в більш високочастотну область.

4.6. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі з осадовим шаром та без (модельне оголення до корінних порід)

В розділі представлено результати числового експерименту з аналізу сейсмічної реакції ґрунтової товщі на максимально можливі сейсмічні впливи з умовним зняттям у розрахунковій моделі осадових порід. Отримані дані дозволяють оцінити сейсмічну небезпеку на території Ташлицької гідроакумулююча електростанція (ГАЕС) та детально вивчити вплив локальних ґрунтових умов на кількісні параметри сейсмічних впливів [Кендзера, Семенова, 2018; Кендзера, Семенова, 2019].

На рис. 4.16 представлено огинаючу сукупності розрахованих спектрів реакції одиничних осциляторів з згасанням 5% на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічного району I (вододільна рівнина), виділеній за даними СМР у межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС у випадках: а) ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами потужністю 17 м.

На рис. 4.17 представлено огинаючу сукупності розрахованих спектрів реакції одиничних осциляторів з власним згасанням 5% від критичного на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічного району IV (днище незатоленої частини Ташлицької балки), виділеній в межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС у випадках: а) ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами товщиною 4 м.

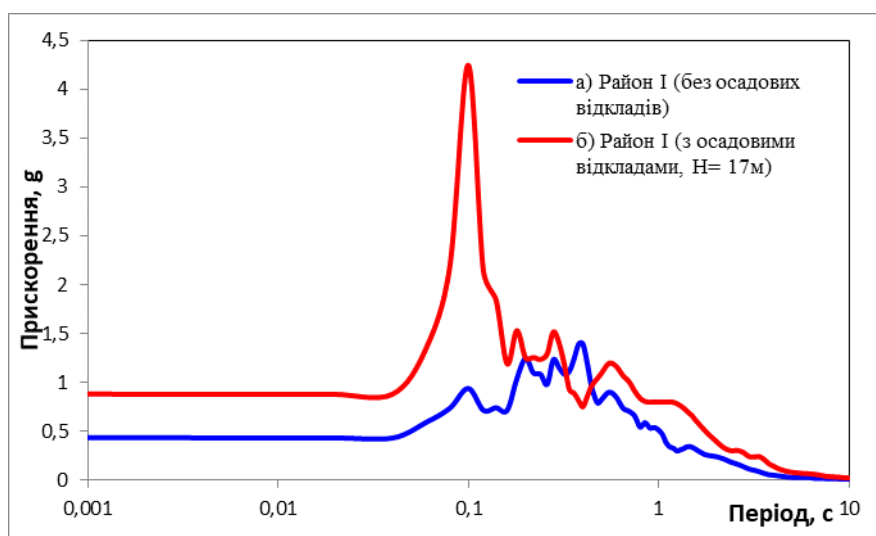


Рис. 4.16 Огинаючі сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із згасанням 5%) на задані акселерограмами з різними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічного району I (вододільна рівнина) у випадках: ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід) (а); з осадовими відкладами товщиною 17 м (б)

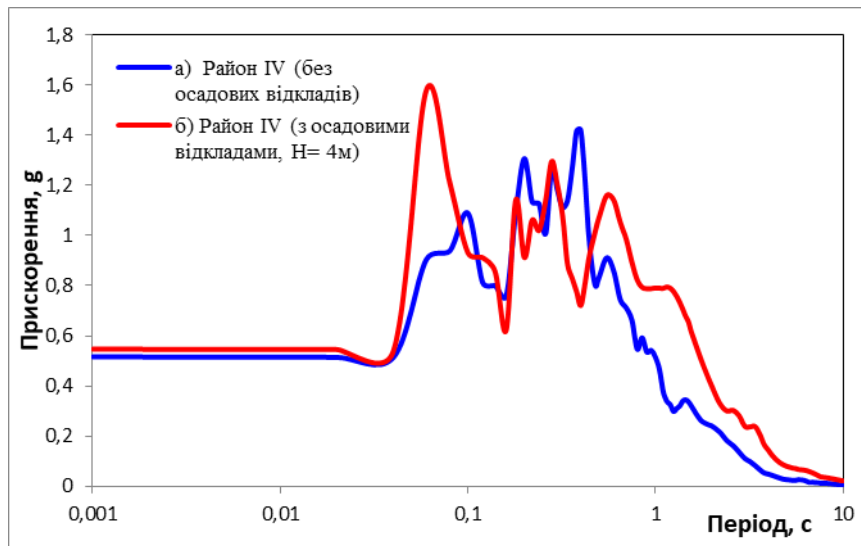


Рис. 4.17 Огинаючі сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із згасанням 5%) на задані акселерограмами з різними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічного району IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки) у випадках: ґрунтова товща без осадових відкладів (модельне оголення до метаморфічних гірських порід) (а); з осадовими відкладами потужністю 4 м (б)

Теоретичні обчислення показали, що такі зміни в розрахунковій моделі, як зняття осадового шару (ґрунту з низькою жорсткістю) до метаморфічних гірських порід, призводить до зменшення сейсмічного ефекту на поверхні. Зменшення проявляється у всіх розрахованих спектрах реакції в зміні таких параметрів, як максимальна амплітуда та ширина спектра. Зменшення потужності осадового шару призводить до зменшення максимальної амплітуди і ширини спектра сейсмічних коливань на поверхні.

Якщо порівнювати геологічну будову інженерно-геологічних районів I (вододільна рівнина) та IV (дно незатопленої частини Ташлицької балки), виділених в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС, то головний параметр, який їх відрізняє і впливає на сейсмічний ефект на поверхні, це - потужність осадових відкладів. В інженерно-геологічному районі I вона становить 17 м, а в районі IV – 4 м. З рис. 4.15 та рис. 4.16 видно, що

різниця в 13 – 17 м осадового шару може суттєво змінити спектральний склад та інтенсивність сейсмічних коливань на вільній поверхні.

Аналіз рис. 4.16 показує, що підсилюючі коливання ґрунти в інженерно-геологічному районі I, з потужністю осадових відкладів 17 м, мають резонуючі властивості на частотах коливань 10 Гц.

З огинаючої сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів, із власним згасанням 5% від критичного, на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, також видно, що, максимальні пікові прискорення в сейсмічних коливаннях спостерігаються на частоті 10 Гц ($T=0,1$ с). Якщо осадовий шар товщиною 17 м в розрахунковій моделі геологічного середовища умовно зняти, то фільтруючі властивості інженерно-геологічного району № I зміняться: частота переважаючих за амплітудою коливань зміститься в бік високих частот і вийде за межі інженерного частотного діапазону (від 0,01 Гц до 20 Гц), що в свою чергу вплине на спектри реакції одиничних осциляторів і призведе до зменшення величини максимальних пікових прискорень в сейсмічних коливаннях з інженерними частотами.

Дослідження сейсмічних властивостей інженерно-геологічного району № IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділеного в межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС, показало, що товщина осадових відкладів товщиною 4 м має незначний вплив на трансформацію сейсмічних коливань. Це видно з рис. 4.17, на якому представлена розрахована для району № IV обвідна сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (згасання 5%) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями. Незначний вплив осадових відкладів малої товщини пояснюється відсутністю накопичення в них енергії падаючих, відбитих, заломлених та перевипромінених сейсмічних хвиль, і тим що їх власні частоти лежать поза інженерним діапазоном.

Сильніші сейсмічні ефекти спостерігаються при наявності значної товщини осадового шару. На рис. 4.18 представлено розраховану огинаючу

сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із згасанням 5%) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічного району II (Ташлицька гребля), виділена в межах території розташування основних споруд Ташлицької ГАЕС: а) ґрунтова товща без осадових відкладів (їх умовне зняття до метаморфічних гірських порід); б) з осадовими відкладами товщиною 54,4 м. Район відрізняється від попереднього більшою товщиною осадових відкладів, а також значною товщиною 37,4 м середньо та інтенсивно вивітрених гранітогнейсів. Для порівняння, у моделі ґрунту на інженерно-геологічного району № IV товщина гранітогнейсів становить всього 5,5 м, а в моделі інженерно-геологічного району № IV 19,3 м. Розраховані для їх моделей спектри реакції свідчать, що потужні осадові відклади зміщують спектральний склад прогнозованих коливань в бік низьких частот і одночасно зменшуючи їх потужність.

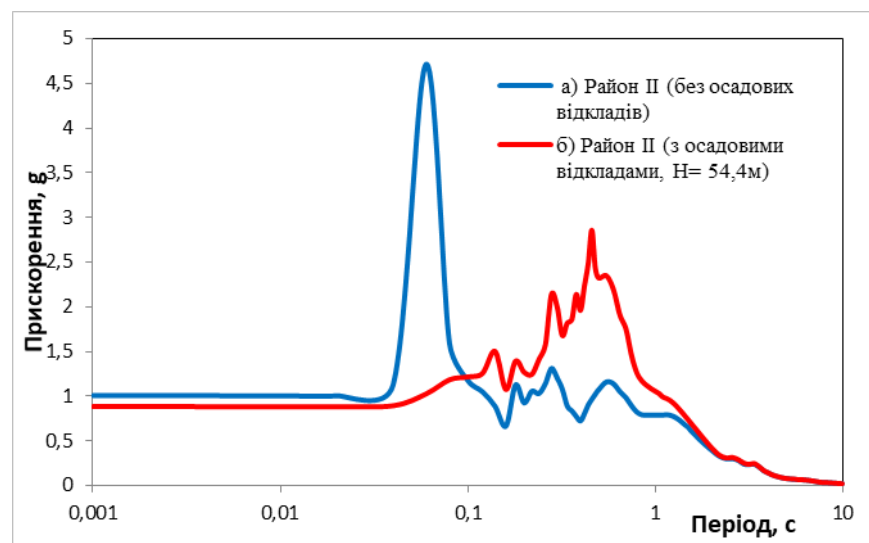


Рис. 4.18 Огинаючі сукупності спектрів реакції одиничних осциляторів (із згасанням 5%) на задані акселерограмами сейсмічні впливи з різними максимальними піковими прискореннями, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічного району II (Ташлицька гребля) у випадках: ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне зняття до метаморфічних гірських порід) (а); з осадовими відкладами потужністю 54,4 м, середньо та

інтенсивно вивітрілими гранітогнейсами потужністю 37,3 м на кристалічному фундаменті (півпросторі) (б)

Значний за товщиною осадовий шар за рахунок своїх реологічних властивостей, може понизити значення максимальних пікових прискорень коливань ґрунту на вільній поверхні, і збільшити максимальні прискорення у низькочастотній області. Зняття осадового шару, як видно з рис. 4.18, призведе до істотного збільшення пікового значення прискорень і їх переміщення в діапазон високих частот. Тобто може спостерігатися ефект протилежний до зображеного на рис. 4.16 і рис. 4.17. Потужний шар середньо та інтенсивно вивітрених гранітогнейсів (в даному випадку товщиною 37,3 м) своїми резонансними властивостями перевищує вплив тонкого осадового шару. Таким чином, при проектуванні сейсмостійкого об'єкту, зняття осадового шару, не завжди призведе до зменшення проявів сейсмічних впливів на будівельному майданчику. В кожному конкретному випадку необхідно враховувати як інформацію про очікувані в досліджуваному районі землетруси (їх максимальну інтенсивність, спектральний склад та тривалість) так і дані про будівельні характеристики проектуваного об'єкту [Кендзера, Семенова, 2017; Кендзера, Семенова, 2018; Кендзера та ін., 2019]. Це дозволить встановити доцільність (або її відсутність) зняття осадового шару для покращання сейсмічних умов майданчика. Незначна зміна параметрів осадового комплексу може суттєво вплинути на спектральний склад і величину сейсмічних коливань, що, в свою чергу, може збільшити сейсмічну вразливість проектованої споруди до реальних землетрусів з близьких потенційно сейсмоактивних зон та зони Вранча, здатної генерувати небезпечні землетруси практично на всій території України.

Висновки до розділу 4

Розглянуто механізми трансформації сейсмічних хвиль при поширенні в ґрунтових товщах. Пояснюються три основні механізми: підсилення

сейсмічних коливань внаслідок переходу сейсмічних хвиль в верхні шари з меншими значеннями сейсмічних жорсткостей; резонансні підсилення коливань, які виникають внаслідок збігу частоти коливань сейсмічної хвилі з частотою власних коливань ґрунтових відкладів; нелінійність взаємозв'язку між напруженням і деформацією ґрунтових шарів. Останній механізм, як правило, призводить до ослаблення коливань і пониження резонансних частот. Як виняток, у водонасичених ґрунтах нелінійність залежності напруження-деформація може призводити і до збільшення амплітуд коливань при великих деформаціях. Результатом дії трьох механізмів зазвичай є підсилення слабких сейсмічних коливань в ґрунтах і ослаблення сильних. Прояви перших двох механізмів залежать від співвідношення довжини хвилі і товщини шару. При малій товщині шару, порівняно з довжиною хвилі, амплітуди коливань в шарі визначаються тільки його сейсмічною жорсткістю. При збільшенні товщини шару проявляються його резонансні властивості, і додаткове зростання амплітуди може бути трьох-чотирикратним. Якщо осадові відклади горизонтально шаруваті, резонансні явища мають місце тільки для об'ємних хвиль, що поширюються вертикально в осадовій товщі. Якщо структура осадової товщі 2-х- або 3-х-мірна, тобто є горизонтальні неоднорідності, наприклад, варіації потужності осадкових басейнів, резонансні явища також спостерігаються для поверхневих хвиль, що розвиваються на таких неоднорідностях. Приведено приклади підсилення та послаблення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами.

Досліджено вплив зміни окремих параметрів властивостей ґрунтової товщі (зокрема вологості, ущільнення наявного в розрізі піску та оголення ґрунтової товщі до корінної породи) на спектральні характеристики коливань ґрунту. Виявлено, що ущільнення піску призводить до зменшення ширини частотного діапазону підсилення сейсмічних коливань та перекачування енергії в більш високочастотну область, що вказує на покращення несучої здатності насипного піску як ґрунтової основи. Збільшення вологості як глинистих, так і піщаних ґрунтів призводить до розширення спектральної області та

перекачування енергії в більш низькочастотну область. Розширення спектральної області зі збільшенням вологості є більш чутливим для пісків порівняно з глинистими ґрунтами.

З використанням чисельного аналізу сейсмічної реакції ґрунтової товщі на максимально можливі сейсмічні впливи з умовним зняттям у розрахунковій моделі осадових порід доведено, що значний за товщиною осадовий шар за рахунок своїх реологічних властивостей, може понизити значення максимальних пікових прискорень коливань ґрунту на вільній поверхні, і збільшити максимальні прискорення у низькочастотній області. Встановлено, що зняття осадового шару, не завжди призведе до зменшення проявів сейсмічних впливів на досліджуваному майданчику. Рекомендовано в кожному конкретному випадку враховувати як інформацію про очікувані в досліджуваному районі землетруси (їх максимальну інтенсивність, спектральний склад та тривалість) так і дані про будівельні характеристики проєктованого об'єкту. Це дозволить встановити доцільність (або її відсутність) зняття осадового шару для покращання сейсмічних умов майданчика. Незначна зміна параметрів осадового шару може суттєво вплинути на спектральний склад і величину сейсмічних коливань.

Перелік використаних джерел до розділу 4

1. Aki K., Richards P. (1980). Quantitive seismology: Theory and methods. 1a. ed, San Francisco (EEUU): Freeman and Company, 1, 557.
2. Amini E., Tawfiq K. S., Aggour, M. S. (1988). "Cohesionless Soil Behavior Under Random Excitation," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 114, 8, 896-9114.
3. Bard P. Y. (1995). Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues. Proceedings of the 10th ECEE / Ed. Duma. Balkema. Rotterdam, 305–324.
4. Boatwright J., Seekins L.C., Fumal Th. E., Lui H.P., Mueller C.S. (1989). Loma Prieta, California earthquake of October 17. Strong ground motion and

ground failure, Marina District: ground-motion amplification / Loma Prieta, California earthquake of October 17, 1989: Marina District. O'Rourke Th. D. (ed.). US Government Printing Office. Washington, D. C. 1992, F35-F49.

5. Boore D. (2003). Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure and Applied Geophysics, 160, 635–676.

6. Chen C.F. (1985). Mechanics of Geomaterials , In Z. Bazant, editor John Wiley & Sons Ltd., 65-86.

7. Chopra A. K. (1981). Dynamics of structures: a primer. Earthquake Engineering Research., 126.

8. Crandall S. H., Mark W. D. (1963). Random vibration in mechanical systems. Academic Press. N.Y., 166.

9. Darragh R. B., Shakal A. F. (1991). The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion, Bull Seism. Soc. Am. 81, 1885-1899.

10. Digital Strong-Motion Seismograph Network KiK-net (2010). National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba, http://www.kik.bosai.go.jp/kik/index_en.shtml.

11. Ewins D. J. (1984). Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press LTD, England.

12. Gutenberg B. (1957). Effects of ground on earthquake motion // Bulletin of the Seismological Society of America, 47, 221–250.

13. Hashash Y., Park D., Tsai C. C., Philips C., Groholski D.R. (2016). «DEEPSOIL - 1-D Wave Propagation Analysis Program for Geotechnical Site Response Analysis of Deep Soil Deposits, Version 6.1», Tutorial and User Manual, University of Illinois at UrbanaCampaign.

14. Housner G.W. (1965). Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. In: Proceedings of the 3rd WCEE, Auckland and Wellington, 1, III-94–III-115.

15. Idriss I.M. (1990). Response of soft soil sites during earthquakes. In: Proceedings, H. Bolton Seed memorial symposium, vol 2, Berkeley, California, 273–289.
16. JGS reconnaissance team (2000). Reconnaissance Report on damage during the 2000 Tottorikenseibu earthquake, JGS, Tokyo (in Japanese).
17. Kameda H. (1990). Loma Prieta earthquake of October 17, 1989 Reconnaissance report, Natural Disaster Research Report, Supported by the Japanese Ministry of Education, Science and Culture (Grant No. 01102044), Japanese Group for the Study of Natural Disaster Science, 347 pp (in Japanese).
18. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. Геофизический журнал, 42(4), 3-17 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020.210669>.
19. Kinoshita S., Ohtake M. (2000). Fundamentals of strong motion, National Research Institute for Earthquake Science and Disaster Prevention. <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/> (in Japanese).
20. Kobe City Developing Department (1995). Investigation of ground deformation of fill by Hyogoken-nambu earthquake (in Japanese).
21. Kramer S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672.
22. Nozu A. (2003). What was made clear by strong earthquake motion observation. Found Eng Equip Mon 31(5), 42–46 (in Japanese).
23. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. (1998). User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 54.
24. Semenova Yu. (2021). Effect of sand consolidation in course of time on seismic properties. Journal of Applied Geology and Geophysics, 9(3), 1, 1-5 DOI:10.9790/0990-0903010105.
25. Si H., Midorikawa S. (1999). New attenuation relationships for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault type and site condition. J Struct Eng 523, 63–70 (in Japanese).

26. Suetomi I., Yoshida N. (1998). Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake, soils and foundations, special issue on geotechnical aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, 2, 11–22.
27. Tokyo Prefecture (1990). Reconnaissance report on Loma Prieta earthquake by reconnaissance team of Tokyo Prefecture, 255 (in Japanese).
28. Yoshida N. (1995). Earthquake response analysis at Port Island during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake. *Tsuchi-to-Kiso* 43(10):49–54 (in Japanese)
29. Yoshida N. (1999). Large earthquake motion and ground -nonlinear problem-, *Jishin Journal, ADEP* (28). 66–74 (in Japanese).
30. Yoshida N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis; Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Series, Volume 36*, Springer: Dordrecht, The Netherlands. 365. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.
31. Yoshida N., Iai S. (1998). Nonlinear site response and its evaluation and prediction. In: *The effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Balkema, Rotterdam, 71—90.
32. Yoshida N., Shinohara H., Sawada S., Nakamura S. (2005). Role of engineering seismic base layer on defining design earthquake motion. *JSCE J Earthq Eng Symp* 28, 170 (in Japanese).
33. Айзенберг Я.М. (1989). Строительная наука против стихии // *Природа*, 12, 68–77.
34. Берзон И. С, Епинатьева А.М., Ларийская Т.Н., Стародубовская С.П. (1962). *Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах*. М.: Изд-во АН СССР, 507.
35. Будівництво в сейсмічних районах України ДБН В.1.1-12:2014. (2014). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 110.
36. Вознесенский Е. А. (1999). *Динамическая неустойчивость грунтов*. Москва: УРСС Эдиториал, 263.

37. Вознесенский Е. А., Кушнарера Е. С., Фуникова В. В. (2014). Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах. Москва: Флинта, 104 .
38. Кендзера А.В., Семенова Ю.В. (2016). Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок. Геофизический журнал, 2, 3-18.
39. Кендзера О.В., Микуляк С.В., Семенова Ю.В., Скуратівський С.І. (2020). Моделювання сейсмічної реакції прошарку ґрунту в рамках нелокальної моделі суцільного середовища // Геофизический журнал, 42(3), 47-58 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204700>.
40. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2017). Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки, Світ геотехніки, 3, 4-14.
41. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2018). Вплив осадової товщі на сейсмічні коливання на території Ташлицької гідроаккумуляційної електростанції. Геодинаміка, 1 (24), 91-99. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.091>.
42. Кендзера О.В., Семенова Ю.В., Вербицький С.Т., Єгупов В.К., Лісовий Ю.В. (2019). Вплив локальних ґрунтових умов на сейсмічні коливання майданчика Ташлицької ГАЕС // Наука та будівництво, 2, 11-19 DOI: [10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65](https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65).
43. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник. (2015). Л. Н. Шутенко, А. Г. Рудь, О. В. Кичаева и др.; под. ред. Л. Н. Шутенко; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 501.
44. Павленко О.В. (2020). Современные методы оценки локальных эффектов землетрясений. Физика Земли, 5, 59–69. <https://doi.org/10.31857/S0002333720040067>.
45. Семенова Ю.В. (2021a). Дослідження спектральних характеристик свіжонамивних пісків та ущільнених з часом пісків для оцінки їх сейсмічної стійкості // Norwegian Journal of development of the International Science, 2(55), 21-25. DOI: [10.24412/3453-9875-2021-55-2-21-25](https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-55-2-21-25).

46. Сеськов В.Е. (2013). Определение физико-механических и динамических характеристик грунтов (насыпных) сейсмическими методами / В.Е. Сеськов // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: М. Ф. Марковский и др. Минск, 5, 298-312.

47. Ультразвук (Маленькая энциклопедия). (1979). Ред. И. П. Голямина Москва: Советская энциклопедия, 400.

РОЗДІЛ 5. СЕЙСМІЧНЕ ЗОНУВАННЯ КИЄВА В ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ КОЛИВАНЬ ҐРУНТУ

5.1. Теоретичні засади і методи сейсмічного зонування Києва в фізичних параметрах коливань ґрунту

Сейсмічне районування території (відображення на картах ділянок території, однорідних в сейсмічному відношенні і з прогнозними однаковими значеннями обраних параметрів сейсмічної небезпеки) є складною і актуальною проблемою сучасної сейсмології, оскільки має вплив на соціальну, економічну і екологічну складові сталого розвитку. Наукова проблема полягає в тому, що прогнозування сейсмічної небезпеки належить до категорії прогнозів, які базуються на неповній інформації [Уломов, Шумилина, 1999].

В період 1960-2000 рр. більшість країн перейшла до сейсмічного районування (зонування) в термінах амплітудних параметрів коливань [Гусев, 2011a]: в пікових прискореннях ґрунту (Європа, Японія, Китай) або в рівнях спектрів реакції одиничних осциляторів (США, Канада), оскільки використання проєктувальниками саме цих параметрів для забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд є коректнішим, у порівнянні з використанням несистемних одиниць, що характеризують сейсмічну небезпеку - балів сейсмічної інтенсивності.

На рис.5.1, як приклад представлено карту сейсмічного зонування для Бельгії в пікових прискореннях ґрунту PGA. Карта сейсмічного зонування для Бельгії була опублікована в бельгійському національному додатку (NBN EN 1998-1 ANB) до європейського будівельного коду Eurocode 8 (EN 1998 -1), який вступив в силу в 2011 році в усіх державах - членах ЄС [Eurocode 8, 2011].

Згідно карти сейсмічного зонування, представленої на рис. 5.1, бельгійські комуни класифікуються за п'ятьма сейсмічними зонами з різними значеннями еталонного пікового прискорення ґрунту (PGA), які необхідно враховувати при сейсмостійкому проєктуванні будівель. У поєднанні з класом відповідальності будівлі і типу ґрунту досліджуваного майданчика, еталонне

PGA використовується для розрахунку максимальних спектрів реакції, по яким визначаються спектральні прискорення, які конструкція повинна витримувати без руйнувань. Карта сейсмічного зонування Бельгії Єврокод-8 була складена Королівською обсерваторією Бельгії на основі повторної реалізації карти сейсмічної небезпеки [Leynaud et al.,2000] для періоду повторюваності 475 років (що еквівалентно 90% ймовірності неперевищення за період в 50 років). Ця карта сейсмічної небезпеки була розрахована відповідно до принципів ймовірнісної оцінки сейсмічної небезпеки і на основі простої моделі сейсмічних вогнищ та їх активності в Бельгії і навколо неї, а також єдиної моделі руху ґрунту (або «закону згасання»), яка описує функцію PGA в залежності від магнітуди землетрусу і епіцентральної відстані. На сьогоднішній день це єдина карта сейсмічної небезпеки, опублікована спеціально для Бельгії, і вона на сьогоднішній день вважається офіційною картою сейсмічної небезпеки для Бельгії.

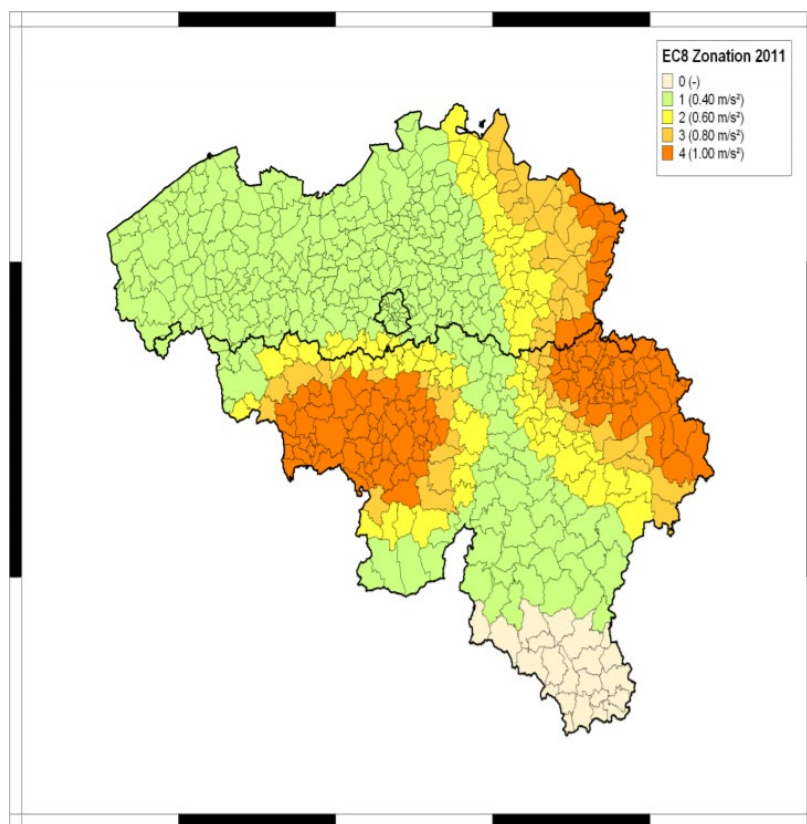


Рис. 5.1 Карта сейсмічного зонування території Бельгії в термінах PGA з 90%-ною ймовірністю не перевищення за найближчі 50 років

На рис. 5.2 представлено карту сейсмічного зонування Чеської Республіки в термінах PGA з 90%-ною ймовірністю не перевищення за найближчі 50 років, яка була включена в будівельний код ČSN 73 0036.

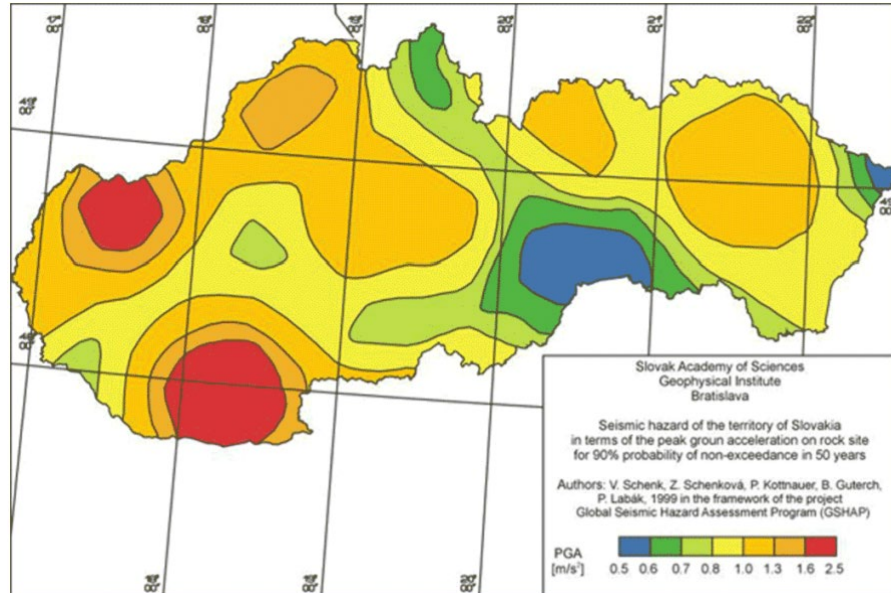


Рис. 5.2 Карта сейсмічного зонування Чеської Республіки в термінах PGA з 90%-ною ймовірністю не перевищення за найближчі 50 років

Актуальність досліджень та результатів, представлених в розділі, обумовлена необхідністю забезпечити проєктувальників сейсмостійкого будівництва картами сейсмічного зонування населених пунктів та агломерацій на території України в фізичних одиницях коливань ґрунту: пікових прискореннях PGA (Peak Ground Acceleration), пікових швидкостях PGV (Peak Ground Velocity) або пікових зміщеннях PGD (Peak Ground Displacement). Розробка карт сейсмічного зонування викликана потребами сучасних методів сейсмостійкого проєктування та будівництва [Кендзера та ін., 2016; Semenova, 2019, Кендзера, Семенова, 2019; Kendzera, Semenova, 2020].

Найбільш стрімко висотне будівництво розвивається в столиці. З огляду на це, в першу чергу, проєктувальникам необхідні карти загального сейсмічного районування в фізичних одиницях коливань ґрунту для території Києва. Їх актуальність пов'язана також з тим, що ділянки з сприятливими в

сейсмічному відношенні ґрунтовими умовами на території міста в переважній більшості уже забудовані. Останнім часом, висотне будівництво все частіше проєктують на наливних пісках, заболочених територіях тощо, тобто на несприятливих у сейсмічному відношенні ґрунтах, які раніше, навіть, не розглядалися в якості основи для будівництва. Будівлі на таких ґрунтах можуть отримати більші пошкодження під час землетрусу.

Найпростіший спосіб побудови карти сейсмічного зонування в фізичних одиницях коливань ґрунту базується на використанні результатів інструментальних спостережень. Але, в умовах слабкої сейсмічності і відносно малої кількості широкосмугових сейсмічних станцій на платформній частині території України, одержати достатню кількість кондиційних інструментальних даних про параметри спостережених сейсмічних коливань - складно. Деякі вчені застосовують кореляційні зв'язки між спостереженою сейсмічною інтенсивністю і фізичними параметрами максимальних пікових прискорень. Наприклад, додаток «Д» до документа «Шкала сейсмічної інтенсивності» [Національний..., 2010]. Результати такого підходу викладені в роботах [Аптікаєв, 2012; Уломов, 1999 та ін.].

Середня залежність між піковими прискореннями ґрунту PGA і бальністю I по Ф.Ф. Аптікаєву [Аптікаєв, 2012]:

$$\lg(PGA) = -0,755 + 0,4I .$$

Середня залежність між піковими прискореннями ґрунту PGA і бальністю I по В. І. Уломову [Уломов, 1999]:

$$\lg(PGA) = -0,222 + 0,333I .$$

На рис. 5.3 показано фрагмент карти ЗСР-2016 В для території Північного Кавказу, (а) – для 95% -ної ймовірності не перевищення розрахункової інтенсивності протягом 50 років (період повторюваності 1 000 років) і результати його перерахунку з інтенсивності I в балах в пікові прискорення PGA з використанням співвідношень: МСК-64 (б) і Ф.Ф. Аптікаєва (в) (g – прискорення вільного падіння).

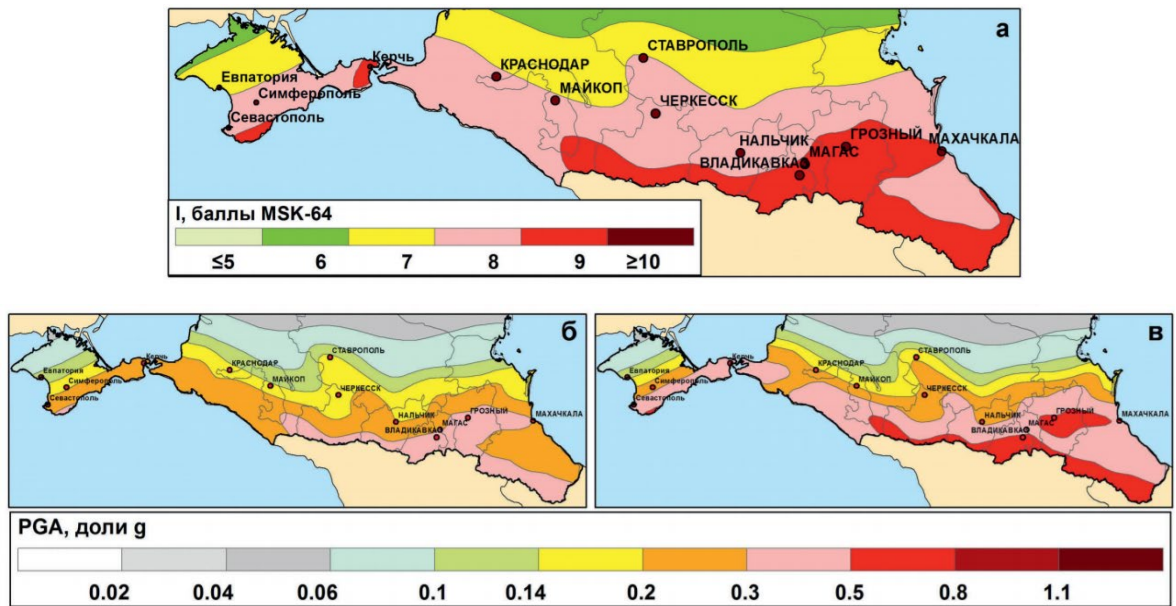


Рис.5.3 Фрагмент карти ЗСР-2016 В для території Північного Кавказу (а) (95% -на ймовірність не перевищення розрахункової інтенсивності протягом 50 років, період повторюваності 1 000 років) і результати його перерахунку з інтенсивності I в балах в пікові прискорення PGA по залежності МСК-64 (б) і Ф.Ф. Аптікаєва (в) (g - прискорення вільного падіння)

На сьогоднішній день, більшість сейсмологів вважає, що такий підхід є фізично некоректним, оскільки не існує прямої залежності між балами шкали інтенсивності сейсмічних коливань та прискоренням ґрунту.

Прямі перерахунки нормативних значень макросейсмічної бальності в амплітудні параметри коливань не враховують спектральний склад сейсмічного впливу і фільтруючі властивості ґрунту. З огляду на це, їх застосування є проблематичним як для використання спектрального методу розрахунку на аварійне сполучення навантажень, з врахуванням сейсмічного впливу, так і для формування карт загального сейсмічного районування із заданою ймовірністю не перевищення параметрів сейсмічної небезпеки вираженої в системних фізичних величинах.

Для умов України в роботі пропонується аналітично-емпіричний підхід до зонування територій в фізичних параметрах коливань ґрунту, оскільки, на даний час, це єдиний спосіб, який можна реалізувати в умовах недостатньої кількості результатів інструментальних сейсмологічних спостережень. Підхід

дає хороші результати для територій в достатній мірі вивчених в геологічному відношенні. Перевага аналітично-емпіричного підходу полягає в можливості його застосування при сейсмічному зонуванні територій зі слабкою та помірною сейсмічністю та з недостатньою кількістю результатів інструментальних сейсмологічних спостережень.

5.2. Таксонометричні ділянки в межах території Києва та їх сейсмогеологічні моделі

На першому етапі побудови карти сейсмічного зонування Києва, в межах території міста методом сейсмо-геологічних аналогій було виділено відносно однорідні інженерно-геологічні таксонометричні ділянки (ділянки), на яких може суттєво відрізнитися сейсмічний ефект. Для виділення таксонометричних ділянок (фізичного районування) було використано геологічну карту четвертинних відкладів, дочетвертинних відкладів, геологічну карту кристалічного фундаменту та схему структурно-геоморфологічного районування території Києва [Semenova, 2021a; Семенова, 2021б]. Дані отримано з каталогу фонду ДНВП "Геоінформ України" [Державна геологічна..., 2001]. Для прив'язки карт з профілями геологічних розрізів до координатної сітки використовувався додаток ArcMap комплексу геоінформаційних програмних продуктів ArcGIS [Angel, 2020]. Всього в межах Києва виділено 16 таксонометричних ділянок. На рис. 5.4 представлена карта таксонометричних ділянок, виділених в межах Києва.

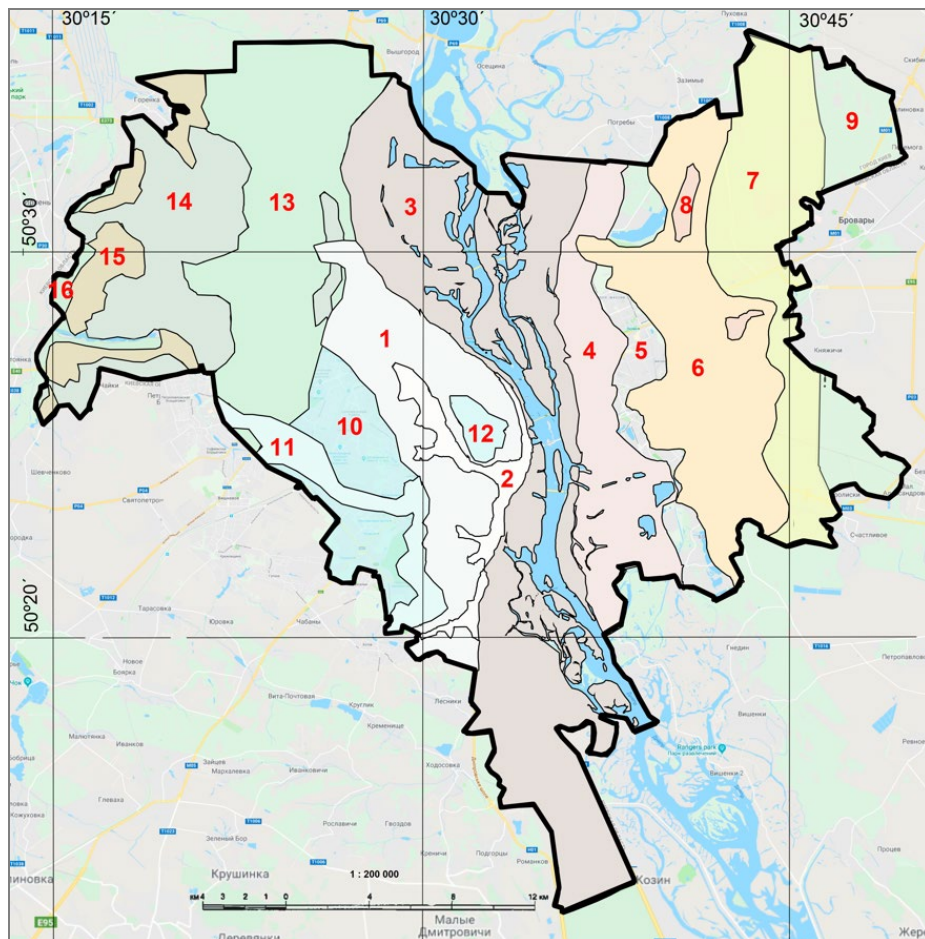


Рис. 5.4 Карта таксонометричних ділянок (№1 ÷ №16), виділених методом сейсмо-геологічних аналогій в межах території Києва

Для всіх таксонометричних ділянок були побудовані сейсмогеологічні моделі ґрунтового середовища. Сейсмогеологічна модель є представленням геологічного середовища у вигляді просторового розподілу фізичних властивостей, які визначають поширення сейсмічних коливань. Як правило, моделюють ізотропні шаруваті середовища, сейсмічні властивості яких визначаються наступними параметрами: швидкостями поздовжніх та поперечних хвиль (або максимальним модулем зсуву), коефіцієнтами поглинання та густиною. Сейсмогеологічна модель складається з геологічних шарів (пластів) з різними фільтруючими властивостями відносно 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 відмінними особливостями є обмеження в просторі доволі простими за формою

границями (підшовою та кривлею шару) і відмінністю пружних властивостей вміщуючої товщі. В умовах субгоризонтального залягання основних інженерно-геологічних елементів ґрунтового масиву для оцінки впливу товщі осадових порід рекомендується використовувати одномірні (горизонтально шаруваті моделі середовища).

Значення параметрів фізико-механічних властивостей кожного шару горизонтально-шаруватих сейсмогеологічних моделей усіх 16 таксонометричних ділянок, виділених в межах Києва, було прийняте середнім з довідників [Справочник физических..., 1969; Ладынин, 2010, Goodman, 1980; Lama and Vutukuri, 1978, Физические свойства..., 1984; Дортман, 1984, Добрынин и др., 2004 та ін.] та звітів з інженерно-геологічних вишукувань будівельних майданчиків на території Києва.

Склад кожного шару ґрунтової товщі, його фізико-механічні властивості є важливими факторами впливу на величину деформації ґрунту та характер його динамічної реакції при збудженні коливань сейсмічними хвилями.

Основні фізичні параметри фізико-механічних властивостей кожного шару горизонтально-шаруватих сейсмогеологічних моделей усіх 16 таксонометричних ділянок, виділених в межах Києва, наведені в Таблицях 5.1-5.16.

Таблиця 5.1

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 1

Літологічний склад	Потужність Н, м	V_s , км/с	ρ , г/см ³
Суглинок лесовидний, озерний, алювіальний	30	250	1,85
Морена, супісок	10	280	1,8
Суглинок озерний, алювіальний	15	250	1,85
Піски і пісковики	20	340	1,8
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцові	45	500	1,85
Піски і пісковики, крем'янисті	15	520	1,95

Глини і алеврити	120	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Строкати глини, алевроліти, пісковики	35	1300	2,1
Діорити		2900	2,7

Таблиця 5.2

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 2

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Суглинок лесовидний, озерний, алювіальний	30	250	1,85
Морена, супісок	10	280	1,8
Суглинок озерний, алювіальний	15	250	1,85
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	40	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	10	520	1,95
Глини і алеврити	100	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Строкати глини, карбонатні, щільні	40	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Таблиця 5.3

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 3

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Пісок алювіальний	20	300	1,75
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	40	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	10	520	1,95
Глини і алеврити	100	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Строкати глини, карбонатні, щільні	40	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 4

Літологічний склад	Потужність Н, м	V _s , км/с	ρ, г/см ³
Пісок алювіальний	20	300	1,75
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	50	500	1,85
Крейда, мергелі записочені	15	1000	1,87
Глини і алеврити	120	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Строкаті глини, карбонатні, щільні	75	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Таблиця 5.5

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 5

Літологічний склад	Потужність Н, м	V _s , км/с	ρ, г/см ³
Пісок алювіальний	20	300	1,75
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	50	500	1,85
Крейда, мергелі записочені	15	1000	1,87
Піски сірі з глауконітом і стяхіннями пісковиків і кременів	10	570	1,9
Глини і алеврити	110	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Глини строкаті щільні пластичні, пісковики	25	680	1,98
Строкаті глини, карбонатні, щільні	75	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Таблиця 5.6

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 6

Літологічний склад	Потужність Н, м	V _s , км/с	ρ, г/см ³
--------------------	--------------------	--------------------------	-------------------------

Пісок алювіальний	60	300	1,75
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	50	500	1,85
Крейда, мергелі запісочені	15	1000	1,87
Піски сірі з глауконітом і стяжіннями пісковиків і кременів	10	570	1,9
Глини і алеврити	110	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Глини строкаті щільні пластичні, пісковики	25	680	1,98
Строкаті глини, карбонатні, щільні	75	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Таблиця 5.7

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 7

Літологічний склад	Потужність Н, м	V_s , км/с	ρ , г/см ³
Пісок алювіальний	60	300	1,75
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	10	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	50	500	1,85
Крейда, мергелі запісочені	30	1000	1,87
Піски сірі з глауконітом і стяжіннями пісковиків і кременів	15	570	1,9
Глини і алеврити	110	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Глини строкаті щільні пластичні, пісковики	35	680	1,98
Строкаті глини, карбонатні, щільні	140	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 8

Літологічний склад	Потужність Н, м	V _s , км/с	ρ, г/см ³
Пісок озерно-болотяний	3	180	1,6
Пісок алювіальний	37	300	1,75
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	10	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	50	500	1,85
Крейда, мергелі записочені	30	1000	1,87
Піски сірі з глауконітом і стяжіннями пісковиків і кременів	15	570	1,9
Глини і алеврити	110	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Глини строкаті щільні пластичні, пісковики	35	680	1,98
Строкаті глини, карбонатні, щільні	140	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 9

Літологічний склад	Потужність Н, м	V _s , км/с	ρ, г/см ³
Пісок алювіальний	60	300	1,75
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	50	500	1,85
Крейда, мергелі записочені	40	1000	1,87
Піски сірі з глауконітом і стяжіннями пісковиків і кременів	20	570	1,9
Глини і алеврити	100	650	1,9
Піски сірі з прошарками	20	600	1,95

алеєвритів, вуглистих глин			
Глини строкаті щільні пластичні, пісковики	50	680	1,98
Строкаті глини, карбонатні, щільні	160	1200	1,95
Граніти порфіробластичні		2700	2,6

Таблиця 5.10

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 10

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Піски елювіально-делювіально-волові	5	300	1,75
Морена, супісок	5	280	1,8
Суглинок та пісок флювіо-лімногляціальні	20	250	1,85
Піски і пісковики	35	340	1,8
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	25	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	15	520	1,95
Глини і алеєврити	100	650	1,9
Діорити		2900	2,7

Таблиця 5.11

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 11

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Морена, супісок	15	280	1,8
Суглинок, в кривлі пісок флювіо-лімногляціальні	10	250	1,85
Пісок алювіальний	5	300	1,75
Піски і пісковики	20	340	1,8
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	45	500	1,85

Піски і пісковики, крем'янисті	15	520	1,95
Глини і алеврити	120	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Строкаті глини, алевроліти, пісковики	35	1300	2,1
Діорити		2900	2,7

Таблиця 5.12

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 12

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Морена, супісок	5	280	1,8
Суглинок озерний, алювіальний	10	250	1,85
Піски і пісковики	20	340	1,8
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	45	500	1,85
Піски і пісковики, крем'янисті	15	520	1,95
Глини і алеврити	120	650	1,9
Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
Строкаті глини, алевроліти, пісковики	35	1300	2,1
Діорити		2900	2,7

Таблиця 5.13

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 13

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Піски елювіально-делювіально-волові	5	300	1,75
Морена, супісок	5	280	1,8
Суглинок та пісок флювіо-	20	250	1,85

лімногляціальні			
Піски і пісковики	30	340	1,8
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	25	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	10	520	1,95
Глини і алеврити	70	650	1,9
Діорити		2900	2,7

Таблиця 5.14

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 14

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Морена, супісок	5	280	1,8
Суглинок та пісок флювіо-лімногляціальні	20	250	1,85
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	25	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	10	520	1,95
Глини і алеврити	70	650	1,9
Діорити		2900	2,7

Таблиця 5.15

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 15

Літологічний склад	Потужність Н, м	Vs, км/с	ρ , г/см ³
Пісок алювіальний	20	300	1,75
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	25	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	10	520	1,95
Глини і алеврити	70	650	1,9

Діорити		2900	2,7
---------	--	------	-----

Таблиця 5.16

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі таксонометричної ділянки № 16

Літологічний склад	Потужність Н, м	V _s , км/с	ρ, г/см ³
Пісок озерно-болотяний	3	180	1,6
Пісок алювіальний	5	300	1,75
Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцеві	25	500	1,85
Піски і пісковики, крем'яністі	10	520	1,95
Глини і алеврити	70	650	1,9
Діорити		2900	2,7

Для кожного горизонтального шару сейсмогеологічної моделі було визначено додаткові динамічні характеристики для врахування 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 в роботах [Seed, Idriss, 1970; Roblee, Chiou, 2004; Lanzo et al., 2009; Ishibashi, Zhang, 1993 та ін.].

На рис. 5.5, в якості приклада, показані залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву [Idriss, 1999], які використано як динамічні характеристики для шару пісків зеленувато-сірих, глауконіто-кварцевих, розташованого на глибині від 75 м до 150 м в розрізах моделей таксонометричних ділянок №1, №2, №6–13. Ці залежності є модифікацією залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву представлених в роботі [EPRI, 1993] і які за експериментальними даними дають точніші результати відносно спостережених при деформації до 1% застосовуючи еквівалентний лінійний аналіз сейсмічної реакції ґрунту [Idriss, 1999].

На рис.5.6 представлено приклад моделі залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву [Schnabel, 1972] для шару порфіробластичного граніту, який містять сейсмогеологічні моделі середовища таксонометричних ділянок №1 ÷ №9.

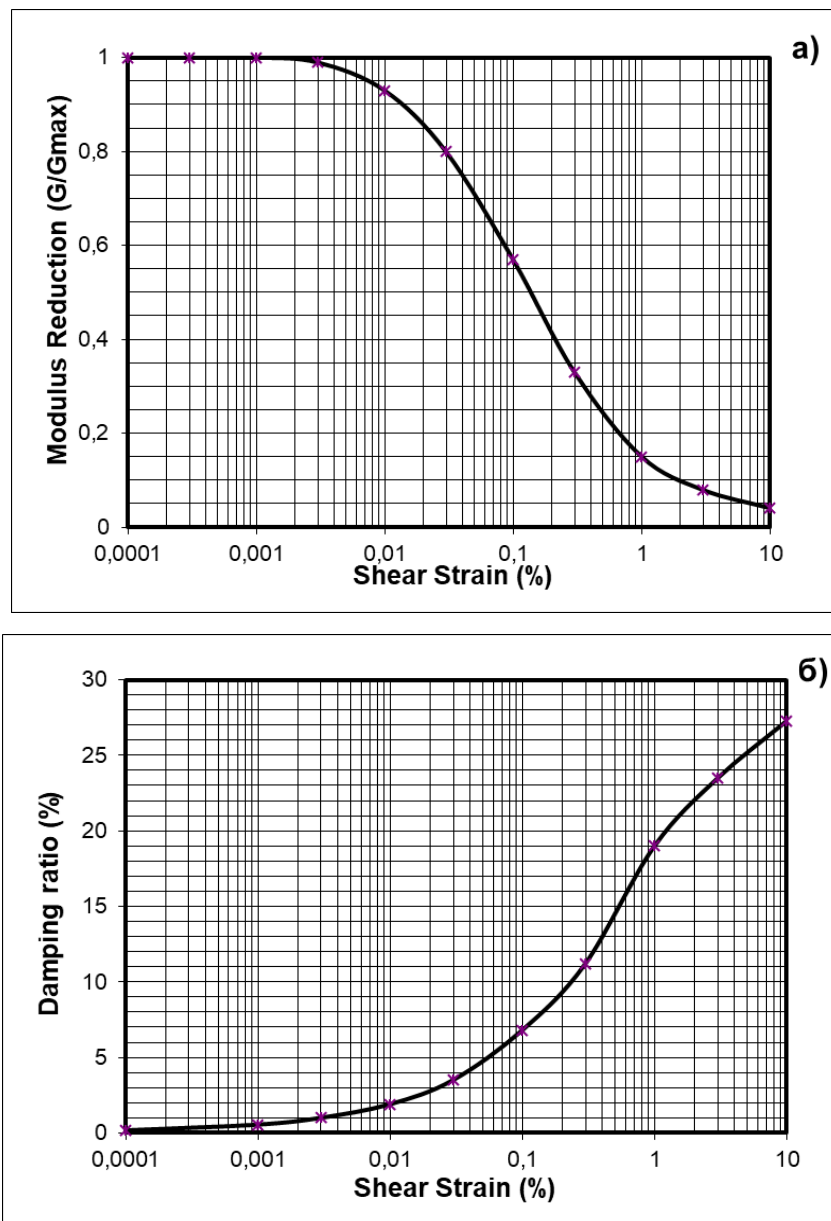


Рис. 5.6 Залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву [Idriss, 1999], які використано як динамічні характеристики для шару пісків зеленувато-сірих, глауконіто-кварцевих, розташованого на глибині від 75 м до 150 м в розрізах моделей таксонометричних ділянок № 1, 2, № 6 – 13

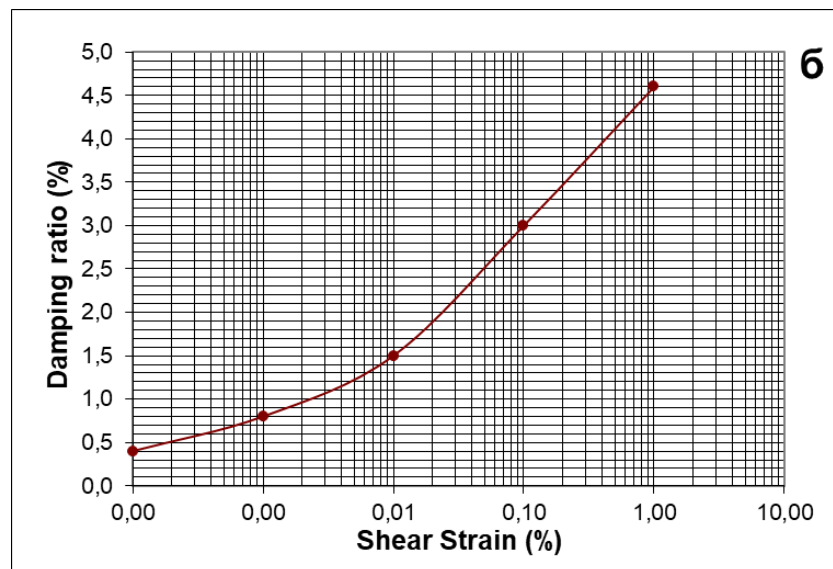
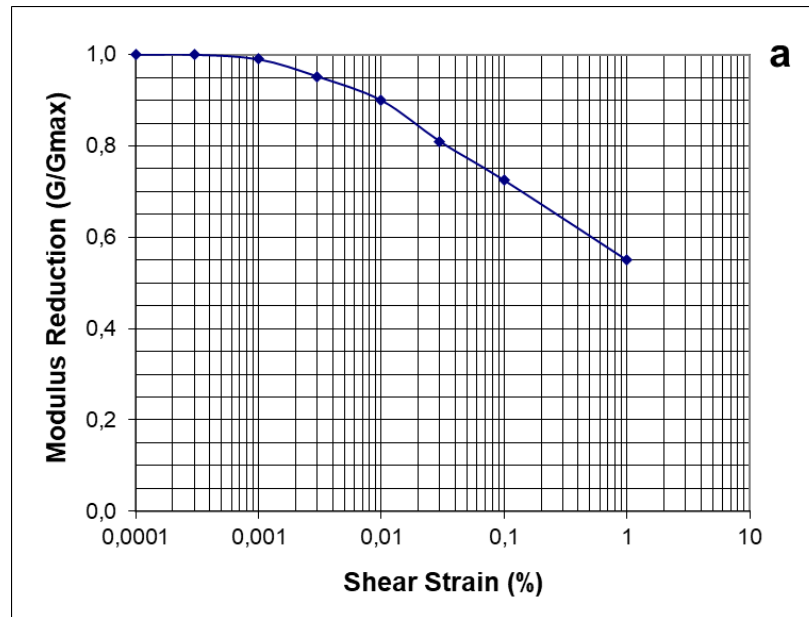


Рис. 5.6 Залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву [Schnabel, 1972] які використано як динамічні характеристики для шару порфіробластичного граніту, який містять сейсмогеологічні моделі середовища таксонометричних ділянок №1 ÷ №9

Залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву підбирались окремо з літературних джерел для кожного шару всіх 16 моделей ґрунтового середовища таксонометричних ділянок Києва. Для врахування нелінійної поведінки ґрунту проводиться ітераційна процедура, розглянута в попередніх розділах, під час якої визначаються модуль зсуву і коефіцієнт

поглинання відповідні ефективній деформації з залежностей цих параметрів від зсувної деформації.

5.3. Поправочні ґрунтові коефіцієнти для території Києва

В розділі приведено результати чисельного аналізу сейсмічної реакції моделей ґрунтових товщ 16 таксонометричних ділянок, виділених на території міста. Розрахунки проведено з врахуванням нелінійного деформування ґрунту.

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 підкорових землетрусів із зони Вранча. Такі землетруси мають різний спектральний склад, тривалість коливань і часовий розподіл різних цугів сейсмічних хвиль.

Для чисельного моделювання сейсмічної реакції розрахункових моделей 16 таксонометричних ділянок, виділених на території міста, було відібрано 26-ть вхідних рухів у вигляді акселерограм, зареєстрованих на скельних ґрунтах з різним спектральним складом і різною тривалістю. Максимальні амплітудні значення були прийняті на основі узгодження даних про сейсмічну небезпеку території України з метою адекватного аналізу відгуку ґрунту і уникнення його переоцінки [Національний..., 2010]. Амплітудно-частотний склад коливань на вільній поверхні для кожної ділянки зонування визначався шляхом перерахунку вхідних рухів з нижнього напівпростору через сейсмогеологічні ґрунтові моделі, що апроксимують геологічні розрізи кожної ділянки.

Для врахування нелінійного деформування ґрунту при потужних землетрусах було використано еквівалентно лінійний аналіз сейсмічної реакції з використанням програмного продукту ProShake [ProShake Ground..., 1998; Schnabel et al., 1972]. В результаті для кожної сейсмогеологічної моделі 16-ти таксонометричних ділянок розраховано частотні характеристики ґрунтового

середовища. На рис. 5.7 представлено розраховані амплітудно-частотні характеристики сейсмогеологічних моделей ґрунтового середовища 16 таксонометричних ділянок виділених в межах Києва.

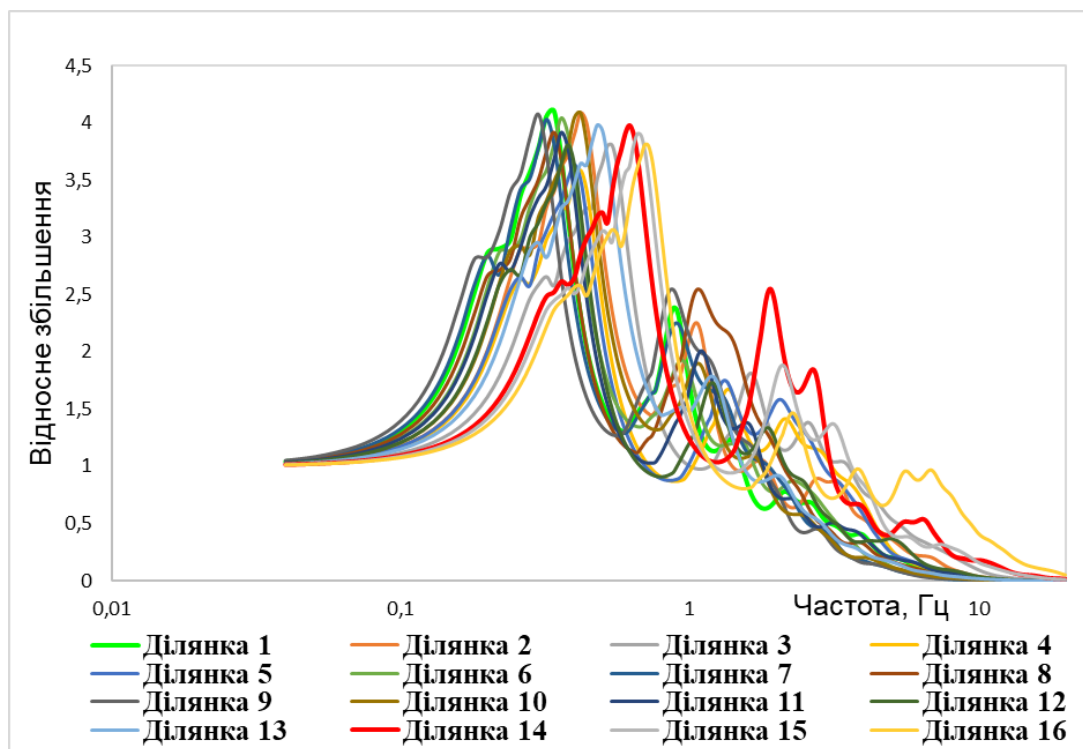


Рис. 5.7 Частотні характеристики ґрунтового середовища для 16-ти таксонометричних ділянок в межах Києва

З аналізу розрахованих частотних характеристик, представлених на рис. 5.7, видно, що вони мають деяку схожість – 2 максимуми: перший максимум частотних характеристик ґрунтової товщі з коефіцієнтом підсилення біля 4 проявився для більшості зон; другий спостерігається лише для деяких ділянок. Наприклад, для ділянок №8 і №9. На частотних характеристиках моделей ґрунтової товщі ділянки №13 та №16, видно, що другий максимум на них майже відсутній. Узагальнюючи опис частотних характеристик, представлених на рис.5.7 можна стверджувати, що вони мають схожу форму, з деякими зміщеннями пікових значень по частоті.

На наступному етапі було розраховано усереднену амплітудно частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва. Усереднена частотна характеристика розраховувалась, як функція розподілу середніх значень

коефіцієнта спектрального підсилення сейсмічних коливань всіх таксонометричних ділянок по частоті [Кендзера, Семенова, 2021б]. На рис. 5.8 представлено усереднену амплітудно частотну характеристику ґрунтових умов території Києва.

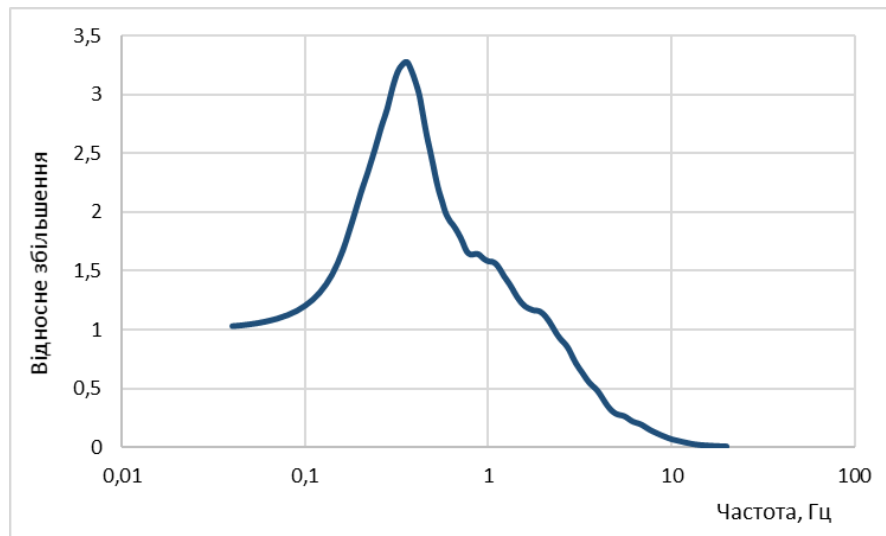


Рис. 5.8 Усереднена амплітудно частотна характеристика ґрунтових моделей 16 таксонометричних ділянок на території Києва

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 від 0,16 Гц до 0,8 Гц.

Для кожної амплітудно-частотної характеристики розраховано інтегральні спектральні підсилення. Під інтегральним спектральним підсиленням, в даному випадку, приймається площа підспектральної функції. Перевага інтегрального підсилення порівняно з максимальним полягає в тому, що враховується вклад кожної частоти в загальну дисперсію. Для розрахунку інтегрального спектрального підсилення використовувався метод чисельного інтегрування Сімпсона в інтервалі інтегрування від 0 до 20 Гц (інженерний частотний діапазон) з кроком інтегрування 0,02 Гц. На кожному кроці інтегрування використовувалась квадратурна формула Сімпсона [Амосов и др., 1994; Волков, 2007; Вержбицкий, 2013]

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

де h- крок інтегрування 0,02 Гц.

На наступному кроці для кожної зони було розраховано коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення. Вони розраховувались шляхом ділення інтегрального спектрального підсилення кожної зони на середнє інтегральне підсилення, тобто усередненої амплітудно-частотної характеристики для ґрунтових умов території Києва.

В Таблиці 5.17 наведено значення коефіцієнтів інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для кожної таксонометричної ділянки, виділеної в межах території Києва.

Таблиця 5.17

Коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для 16 таксонометричних ділянок території Києва

Таксонометрична ділянка	Коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань
Ділянка 1	0,79
Ділянка 2	1,00
Ділянка 3	1,27
Ділянка 4	0,99
Ділянка 5	0,99
Ділянка 6	0,76
Ділянка 7	0,72
Ділянка 8	0,87
Ділянка 9	0,72
Ділянка 10	0,72
Ділянка 11	0,81
Ділянка 12	0,87
Ділянка 13	0,79
Ділянка 14	1,47
Ділянка 15	1,40
Ділянка 16	1,85

На рис. 5.9 представлено побудовану карту розподілу коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва. Карта, в масштабі 1:200000, дає розподіл по території міста кількісної оцінки впливу спектральних характеристик ґрунтових умов на сейсмічну небезпеку, виражену системними фізичними величинами. З таблиці 5.17 видно, що для деяких таксонометричних ділянок значення коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення однакове. Таким чином на карті території Києва (рис. 5.9) виділено всього 12 зон з різними значеннями коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення.

Розраховані за запропонованою в роботі методикою коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення пропонується використовувати в якості ґрунтових поправочних коефіцієнтів при застосуванні спектрального методу розрахунку на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу [Kendzera, Semenova, 2020a, Кендзера, Семенова, 2021a]. Карта розподілу коефіцієнта інтегрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань може використовуватись для внесення поправок до спектрів сейсмічних коливань, які 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 згасанням коливань. Карта розподілу коефіцієнта інтегрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва, представлена на рис. 5.9, є проміжним етапом при побудові 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 можливість більш обґрунтовано проводити розрахунок будівель та споруд на сейсмічні впливи.

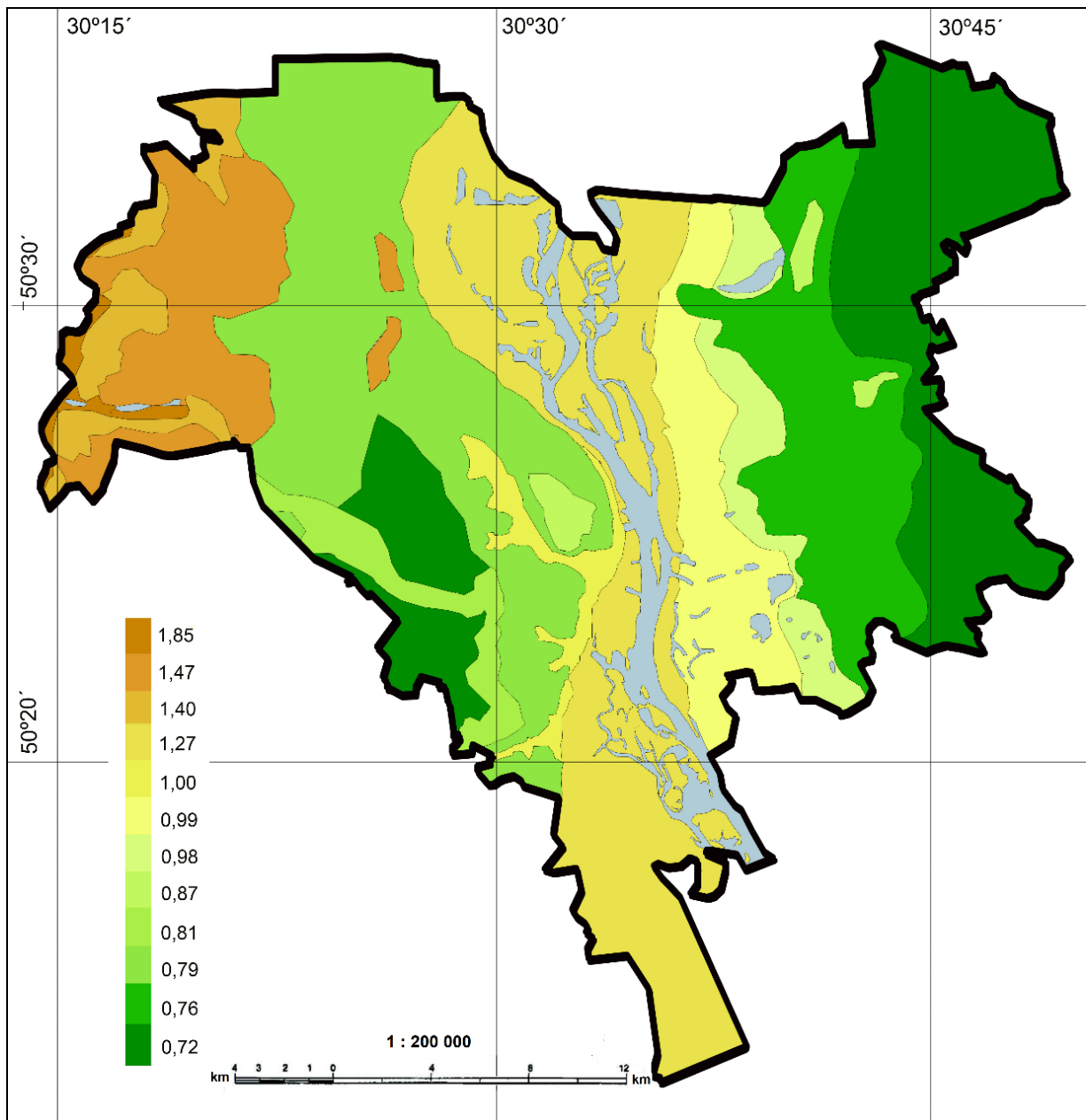


Рис. 5.9 Карта розподілу коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва

Розраховані поправочні ґрунтові коефіцієнти враховують потужність осадової товщі, контрастність сейсмічних жорсткостей між шарами ґрунтової товщі та нелінійні властивості ґрунтів. В цьому є перевага застосування запропонованих дисертантом поправочних коефіцієнтів порівняно з тими, що пропонуються в держаних будівельних нормах [Будівництво, ...2014]. Використання сейсмічної жорсткості в якості параметра, що характеризує властивості ґрунтового масиву, дозволяє перейти до принципово нового опису

взаємозв'язку властивостей ґрунту і параметрів сейсмічних впливів з використанням безперервних (не дискретних) величин. Відносно сейсмічних впливів це вже використовується в американських і європейських нормах, в яких замість бальності, сейсмічні впливи описуються фізичними параметрами сейсмічних коливань ґрунту спектрами реакції або PGA.

5.4. Динамічний аналіз сейсмічної реакції таксонометричних ділянок

Києва

5.4.1. Зміна пікової зсувної деформації і коефіцієнта поглинання з глибиною

При аналізі сейсмічної небезпеки (сейсмічному аналізі) важливим кроком є ідентифікація та кількісне визначення сейсмічно «слабких» шарів, в яких можуть виникати прогресуючі нелінійні ефекти. При цьому необхідно враховувати, що поведінка «слабкого» шару при динамічному (сейсмічному) аналізі може відрізнитись від поведінки «слабкого» шару при статичному аналізі. Наприклад, насичений шар піску вважається придатним матеріалом для закладання в ньому фундаменту споруди при статичних навантаженнях. Однак, такий шар може бути схильним до розрідження при інтенсивних сейсмічних навантаженнях і таким чином він стає «сейсмічно слабким» шаром при динамічному аналізі.

Тому, для визначення сейсмічно слабких шарів, для кожної розрахункової сейсмогеологічної моделі 16-ти таксонометричних ділянок розраховано зміну з глибиною по мірі поширення сейсмічних коливань від корінних порід до вільної поверхні таких параметрів, як: пікова деформація, коефіцієнт поглинання, пікове прискорення ґрунту.

На рис. 5.10 - 5.41 представлено графіки зміни пікової зсувної деформації та коефіцієнта поглинання з глибиною при зондуванні моделей ділянок № 1 ÷ № 16 сейсмічними коливаннями, що імітують 26 вхідних рухів з різним спектральним складом та максимальною амплітудою від 0,01g до 0,06g.

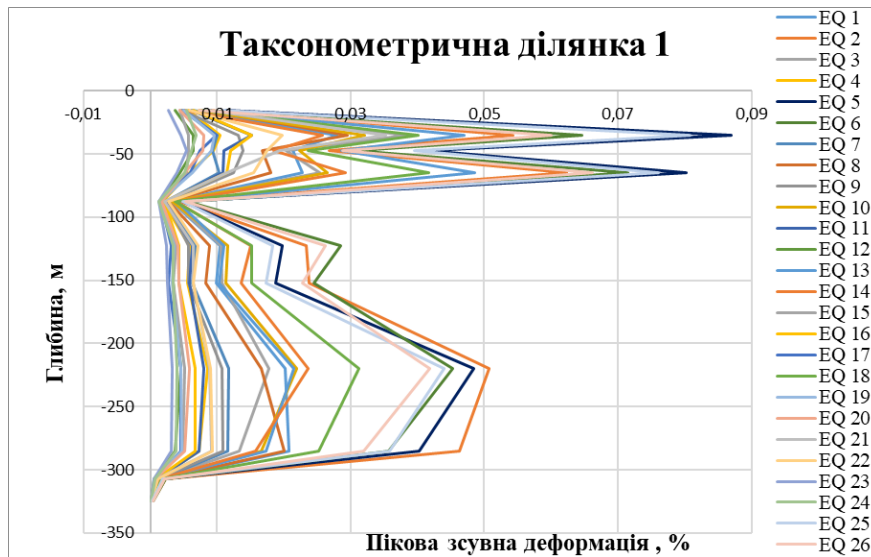


Рис. 5.10 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 1 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

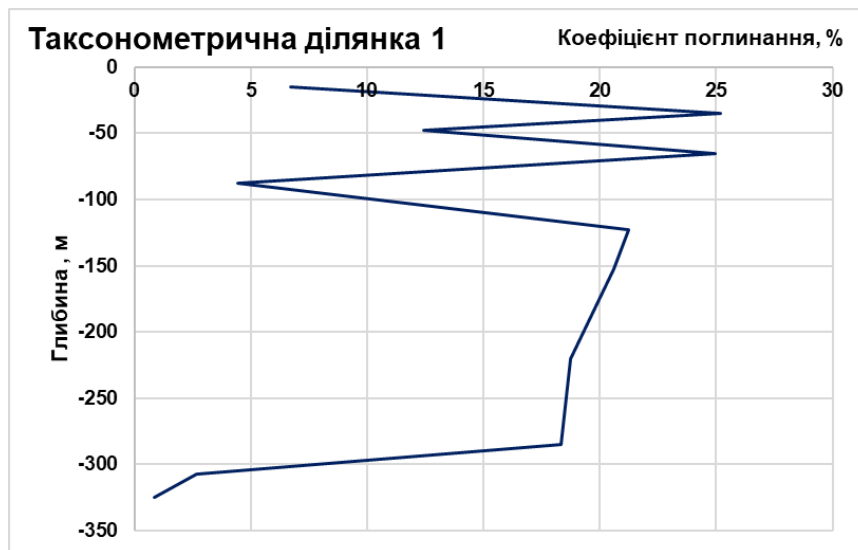


Рис. 5.11 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 1 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки, представлені на рис. 5.10-5.11, демонструють, що найвищі значення як пікової зсувної деформації PSS так і максимального коефіцієнта поглинання D сягають на відмітках глибини 35м і 65 м. Пікова зсувна деформація PSS = 0,087 % і $D = 25,19\%$ досягаються в прошарку складеного мореною та супіском, тобто цей прошарок будемо вважати найбільш

сейсмічно-слабким в сейсмогеологічній моделі таксонометричної ділянки № 1. Однак графіки зміни з глибиною розглядуваних параметрів демонструють 2 чіткі піки на приблизно одному рівні за величиною. Значення $PSS = 0,08\%$ і $D = 24,95\%$ другого піку на глибині 65 м в проявляється прошарку складеного пісками та пісковиками .

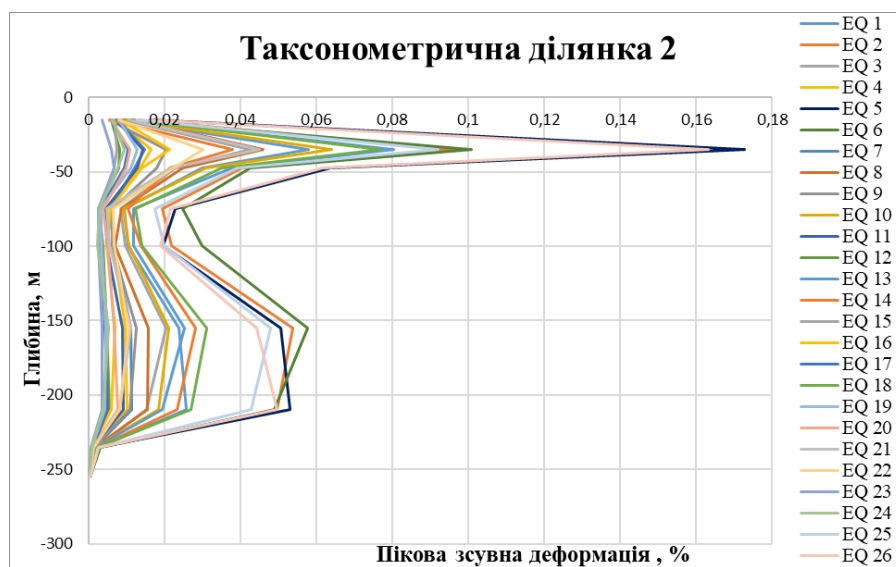


Рис. 5.12 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 2 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

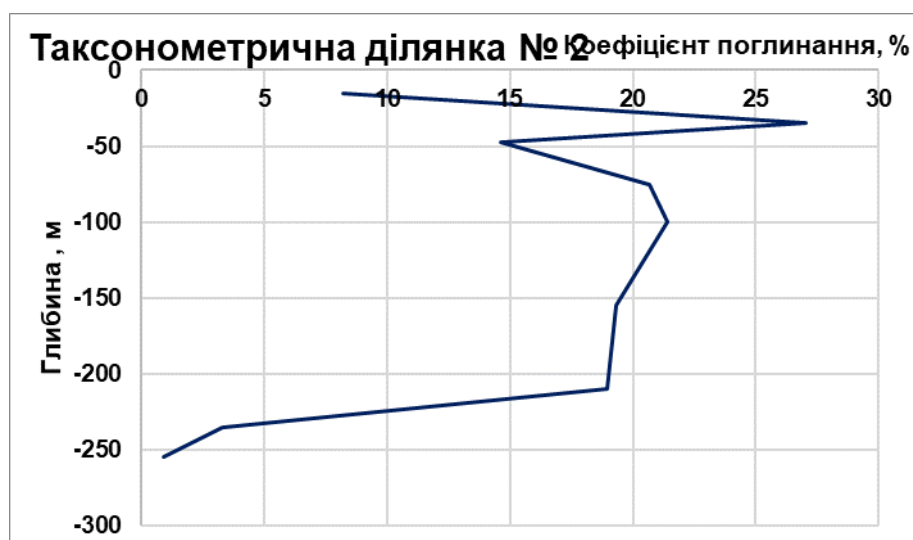


Рис. 5.13 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 2 для 26 вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою прискорення в падаючій хвилі від 0,01g до 0,06g.

З рис. 5.12 – 5.13 видно, що найбільші значення $PSS = 0,173\%$ і $D = 27,05\%$ досягаються на глибині 35 м в прошарку складеного мореною та супіском. Цей же прошарок є сейсмічно-слабким в моделі таксонометричної ділянки №1.

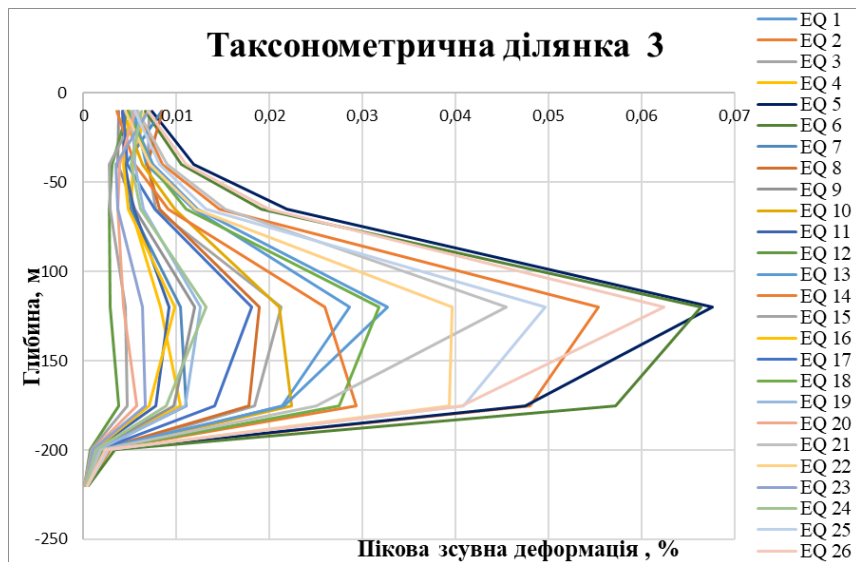


Рис. 5.14 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 3 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

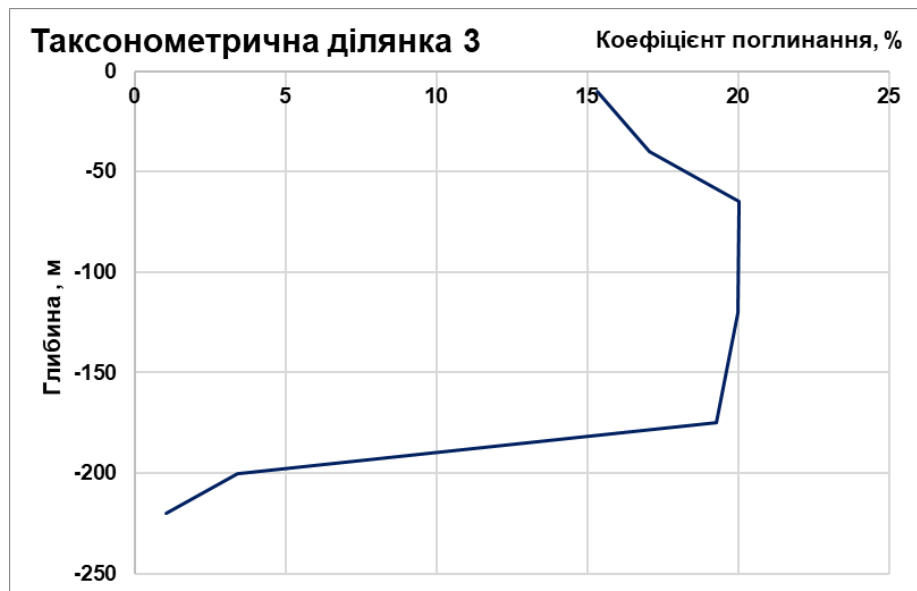


Рис. 5.15 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 3 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки, представлені на рис. 5.14 – 5.15, демонструють, що найвищі значення пікової зсувної деформації PSS 0,057 -0,066 % і максимального коефіцієнта поглинання D 19,28-20,04 % відмічаються на глибині 175 - 65 м. Аналізуючи графіки видно, що в даному випадку немає чіткого піку зміни досліджуваних параметрів, як в попередніх моделях таксонометричних ділянок №1 і №2. В моделі таксонометричної ділянки 3 PSS і D почали зростати в прошарку пісків сірих з алевритами і вуглистими глинами, що пояснюється тим, що цей прошарок характеризується значно меншою жорсткістю від підстиляючого шару. Потім відмічається відносна стабільність значень PSS і D, а ближче до поверхні – їх зменшення значень. Таким чином, в даній моделі сейсмічно слабкого шару не відмічається.

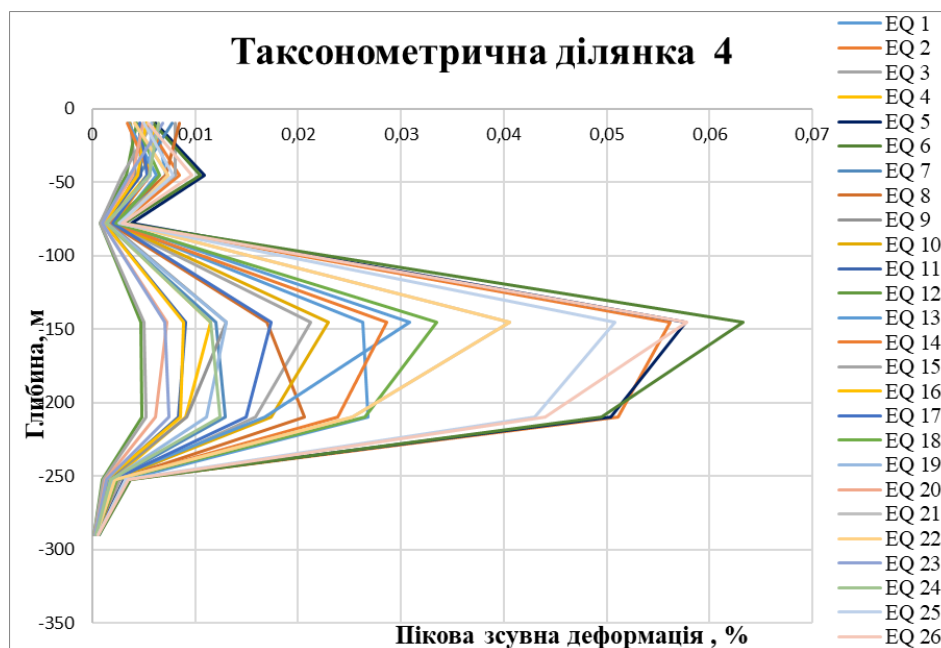


Рис. 5.16 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 4 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g.

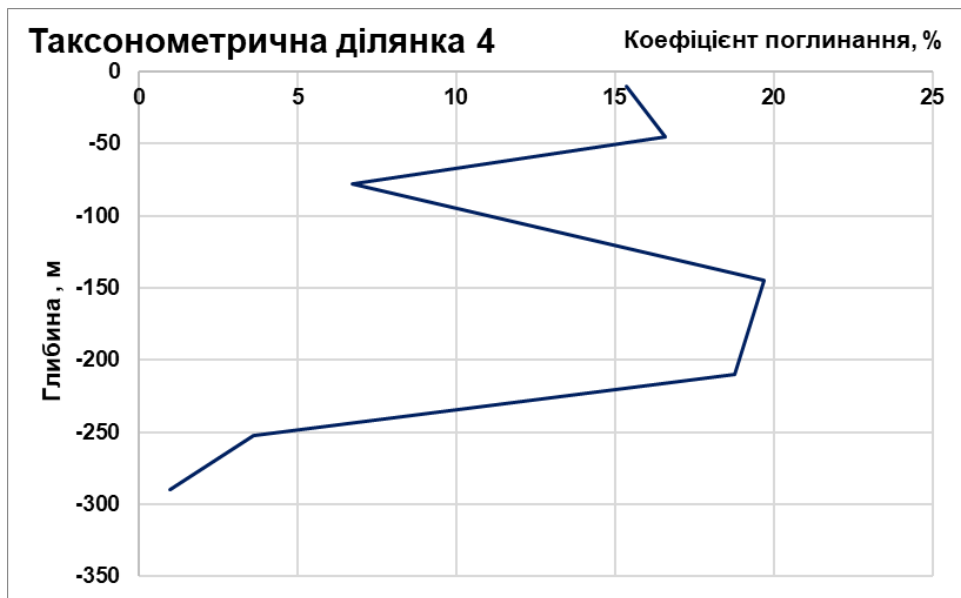


Рис. 5.17 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 4 для 26 вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою прискорення в падаючій хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки, представлені на рис. 5.16 - 5.17, демонструють, що найвищі значення пікової зсувної деформації PSS 0,05 – 0,063 % і максимального коефіцієнта поглинання D 18,8-19,7 % відмічаються на глибині 210 - 145 м в прошарках складених пісками сірими з алевритами і вуглистими глинами та строкатими глинами. В моделі таксонометричної ділянки 3 також не відмітимо сейсмічно слабкого шару, оскільки різке збільшення значень PSS і D відмічається в нижніх шарах і пояснюється зміною акустичної жорсткості між шарами. Варто також відмітити різке зростання максимального коефіцієнта поглинання D до 16,% в прошарку складеного пісками зеленувато-сірими та глауконіто-кварцевими, розташованого на глибині від 20 до 70м.

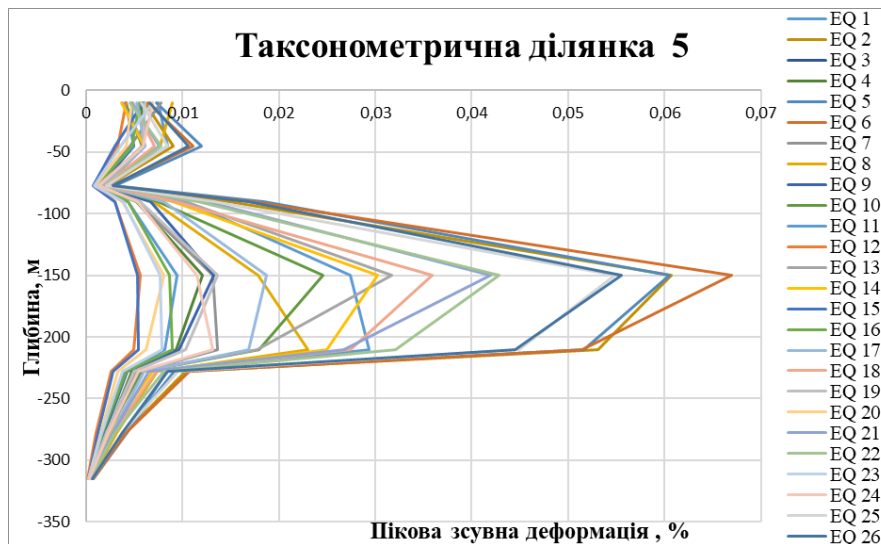


Рис. 5.18 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки №5 для 26 входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

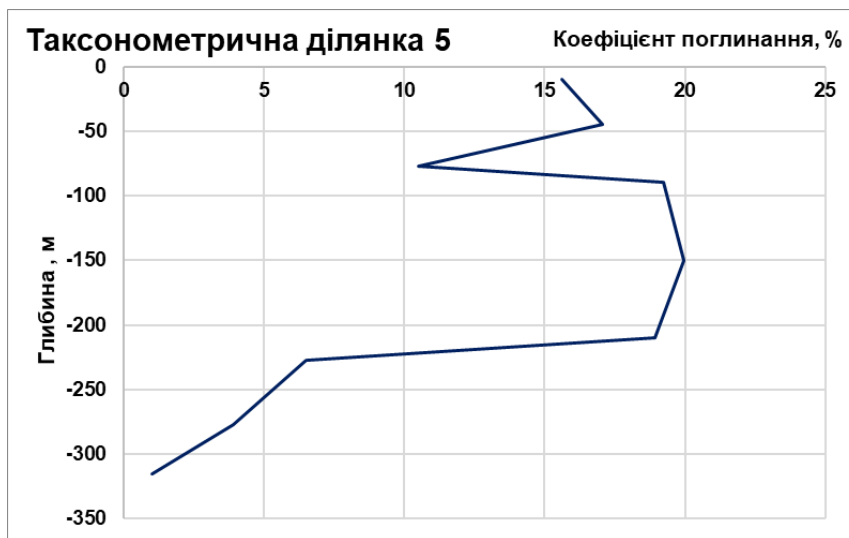


Рис. 5.19 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 5 для 26 входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

З рис. 5.18 – 5.19 видно, що найбільші значення PSS 0,053-0,067 % і $D = 27,05$ % для таксонометричної ділянки 5 досягаються на глибині 210-150 м в прошарку глини та алевролітів, значення D в ньому є в діапазоні 18,95-19,95%. Потім, зі зменшенням глибини в вище розташованому шарі складеному пісками

сірими з глауконітом, максимальний коефіцієнт поглинання D залишається стабільним, змінюючись лише до 19,23%, а PSS скачкоподібно зменшується. В моделі таксонометричної ділянки №5 не встановлено сейсмічно «слабкого» шару, оскільки не спостерігається різких збільшень значень PSS і D в верхніх шарах ґрунту.

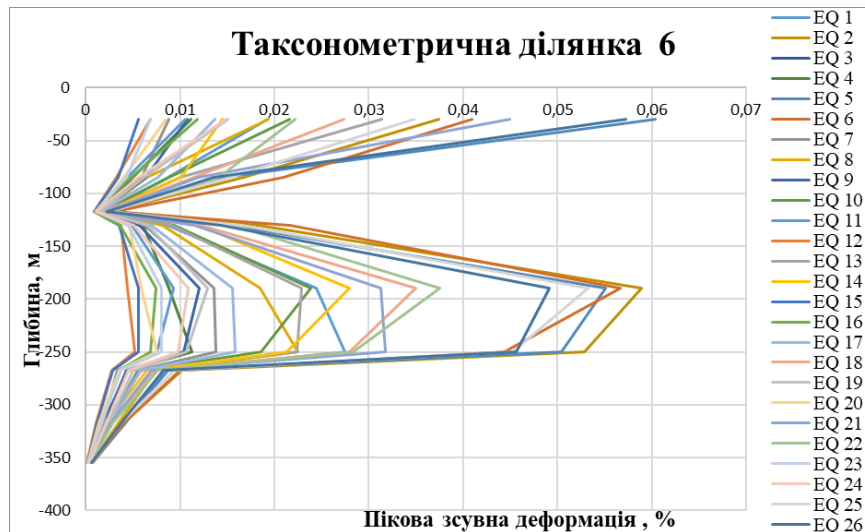


Рис. 5.20 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 6 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

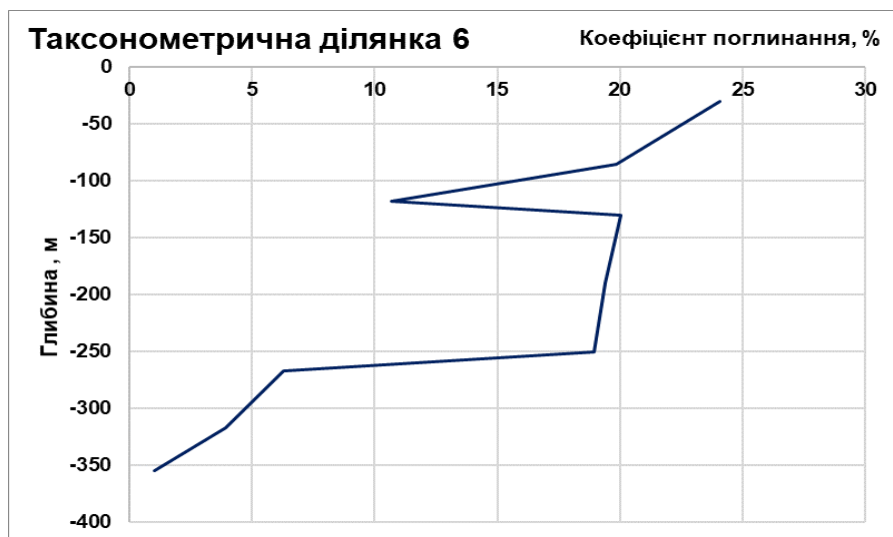


Рис. 5.21 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 6 для 26 входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Таксонометрична ділянка №6, як видно з рис. 5.20 - 5.21 характеризується найбільшими значеннями $PSS=0,06\%$ і $D=24,08\%$ в верхньому шарі, складеного піском алювіальним потужністю 60м. Відмітимо, що верхній шар таксонометричної ділянки №5 має такий же склад, проте потужність його складає 20 м. Оскільки в моделі таксонометричної ділянки №5 в верхньому шарі не спостерігається такого значного збільшення значень PSS і D , можна зробити висновок, що саме велика потужність 60 м алювіального піску спричинила різке збільшення коефіцієнта поглинання і зсувної деформації. Таким чином прошарок алювіального піску будемо вважати сейсмічно слабким при достатній його потужності (до 20 м можна не враховувати його сейсмічно «слабким»).

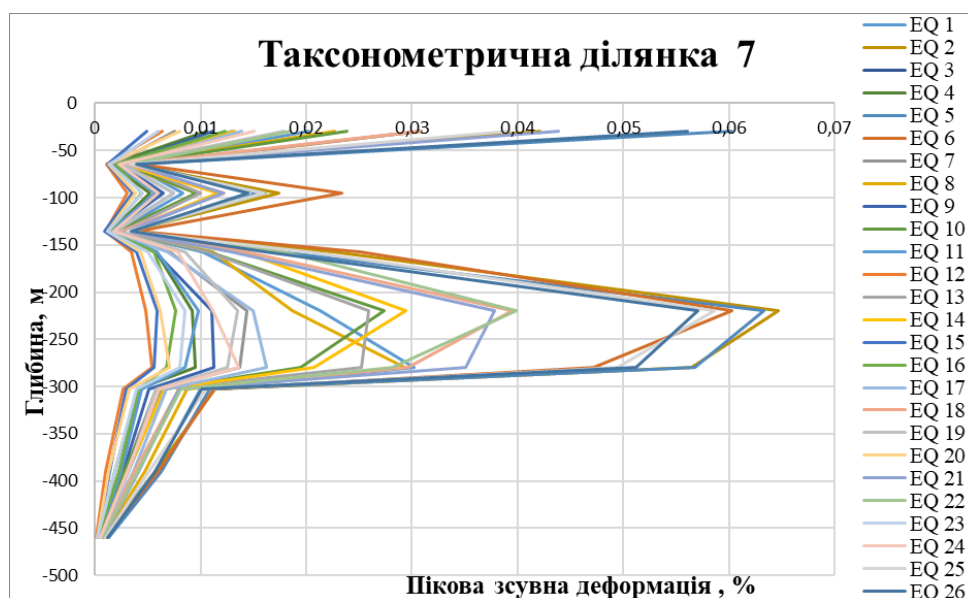


Рис. 5.22 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 7 для 26 вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

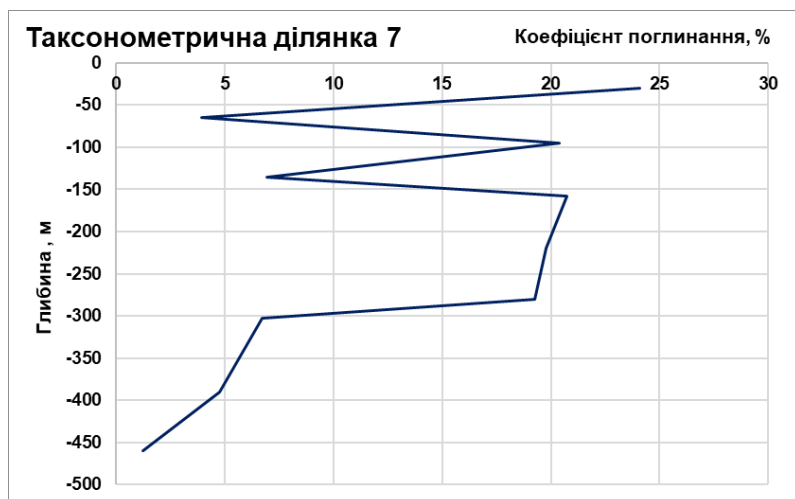


Рис. 5.23 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 7 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

З рис. 5.22 – 5.23 видно, що таксонометрична ділянка № 7 характеризується найбільшими значеннями $PSS=0,06\%$ і $D=24,07\%$ в верхньому шарі, складеному піском алювіальним потужністю 60 м (як і в таксонометричній ділянці №6). Також відмітимо високі значення $D=20,37\%$ в прошарку складеного пісками зеленувато-сірими, глауконіто-кварцевими, розташованому на глибині від 70 м до 120 м. Сейсмічно слабким шаром таксонометричної ділянки № 7 будемо вважати верхній шар алювіального піску потужністю 60м.

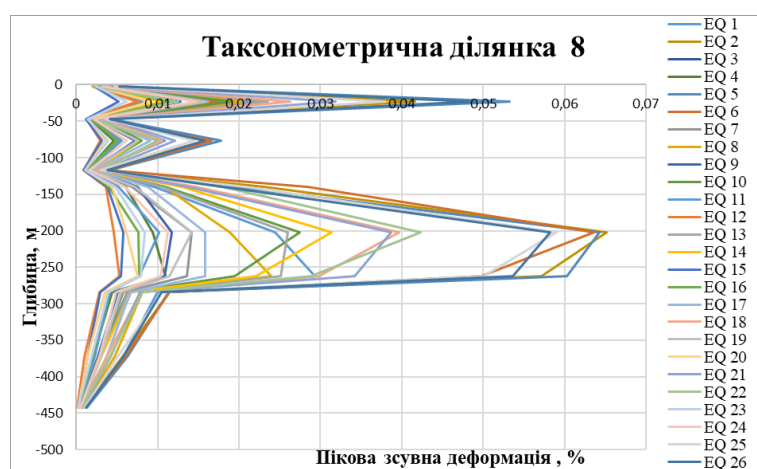


Рис. 5.24 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 8 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

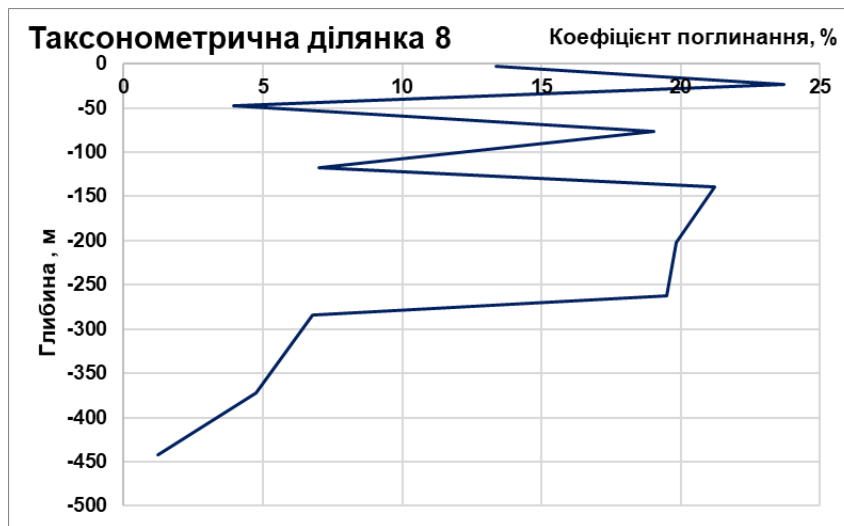


Рис. 5.25 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 8 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки, представлені на рис. 5.24 - 5.25, демонструють, що найвищі значення таксонометричної ділянки № 8 пікової зсувної деформації PSS 0,06-0,065% сягають в прошарку глини і алевролітів на глибини 200-260 м і PSS=0,053% та $D=23,69\%$ в прошарку піску алювіального потужністю 37 м. Відмітимо, що в попередніх моделях таксонометричних ділянок, зокрема №5, де потужність піску алювіального складала 20 м, різкого зростання PSS і D не спостерігалось.

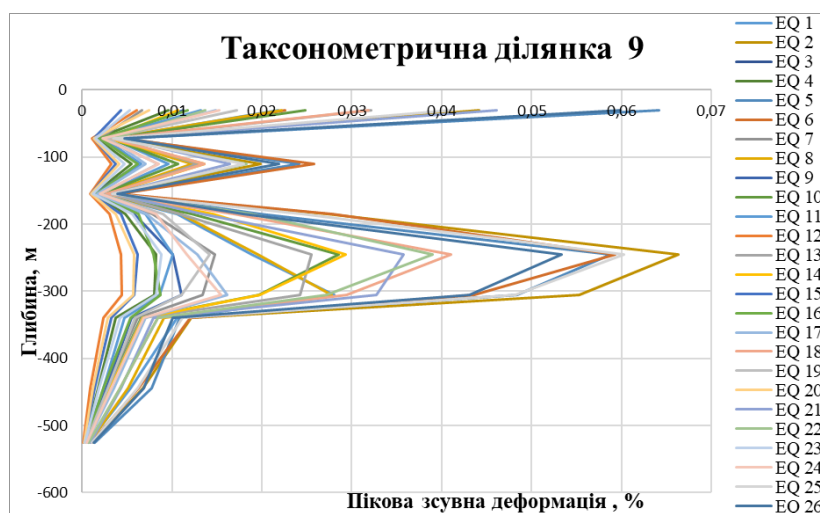


Рис. 5.26. Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 9 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

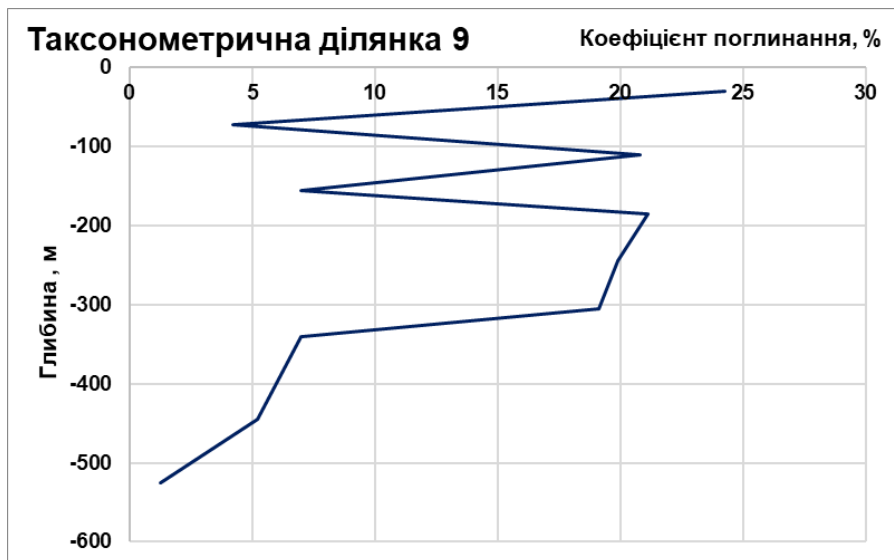


Рис. 5.27 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 9 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки зміни максимального коефіцієнта поглинання D і пікової зсувної деформації PSS з глибиною таксонометричної ділянки № 9 характеризується найбільшими значеннями PSS= 0,064% і $D=24,26\%$ в верхньому шарі піску алювіального потужністю 60 м. Як і в моделі таксонометричної ділянки № 8 спостерігаються також різкі збільшення $D=20,83\%$ в прошарку складеного пісками зеленувато-сірими, глауконіто-кварцовими. В нижніх шарах також спостерігаються різкі збільшення PSS до 0,066% і D до 21,14% в глинах строкатих щільних пластичних та пісках сірих з прошарками алевритів і вуглистих глин. Як сейсмічно слабкий виділяється верхній шар складений піском алювіальним.

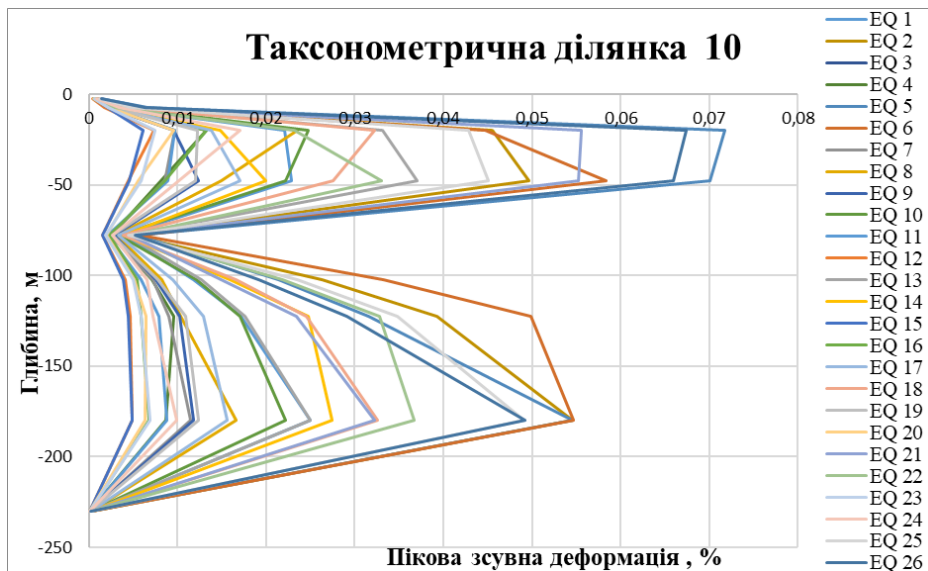


Рис. 5.28 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 10 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

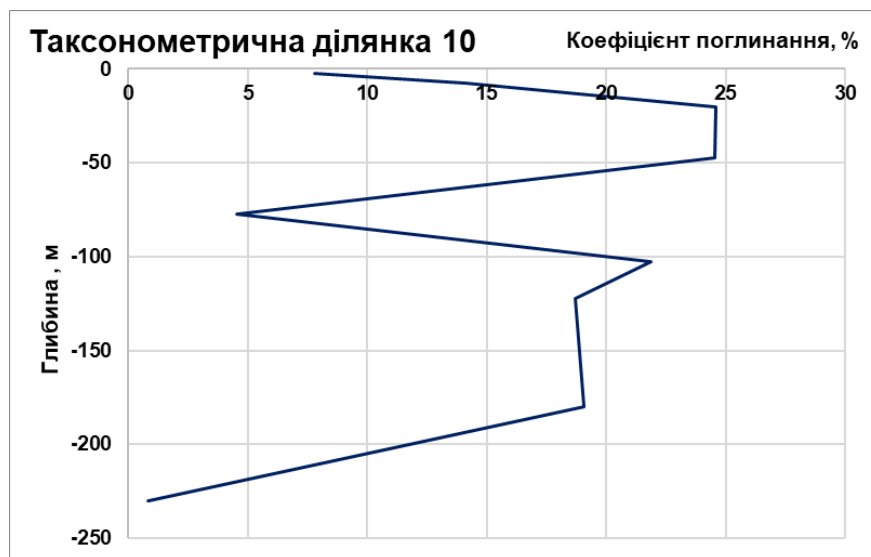


Рис. 5.29 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 10 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки зміни максимального коефіцієнта поглинання D і пікової зсувної деформації PSS з глибиною для таксонометричної ділянки № 10 характеризуються найбільшими значеннями PSS біля 0,07% і D біля 24,5% в

приповерхневих прошарках складених суглинком, піском флюві- гляціальним та пісками і пісковиками.

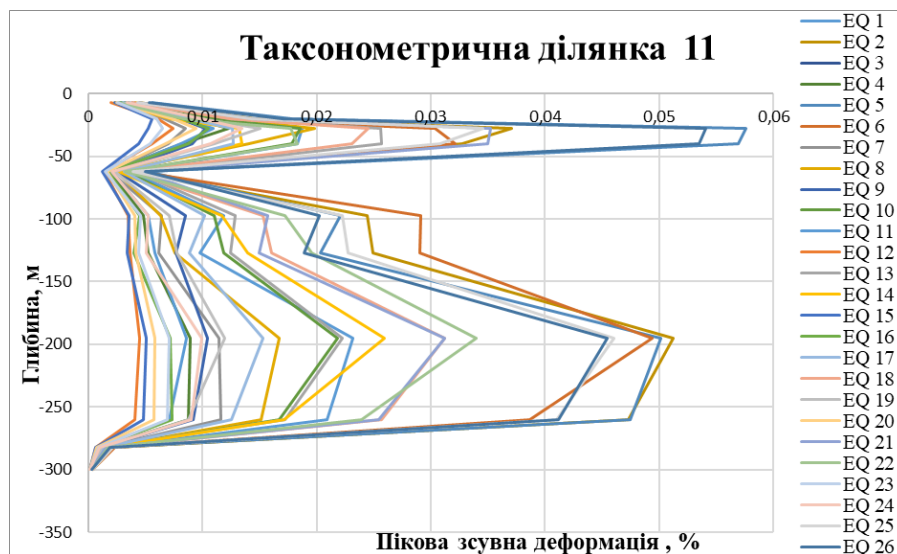


Рис. 5.30 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 11 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

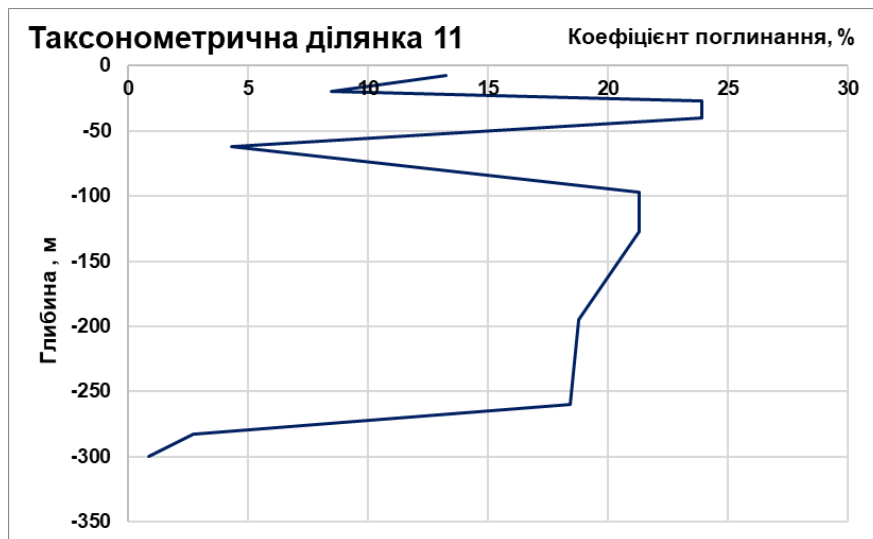


Рис. 5.31 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 11 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Рис. 5.30 – 5.31 демонструють, що в сейсмогеологічній моделі таксонометричної ділянки № 11 слабкими в сейсмічному відношенні є

прошарки на глибині від 25 м до 50 м складені піском алювіальним потужністю 5 м і пісками перешарованим з пісковиками потужністю 20 м. В даному випадку, шар піску алювіального виявився сейсмічно слабким з малою потужністю, оскільки він характеризується подібними деформаційними нелінійними властивостями як і підстилаючий прошарок.

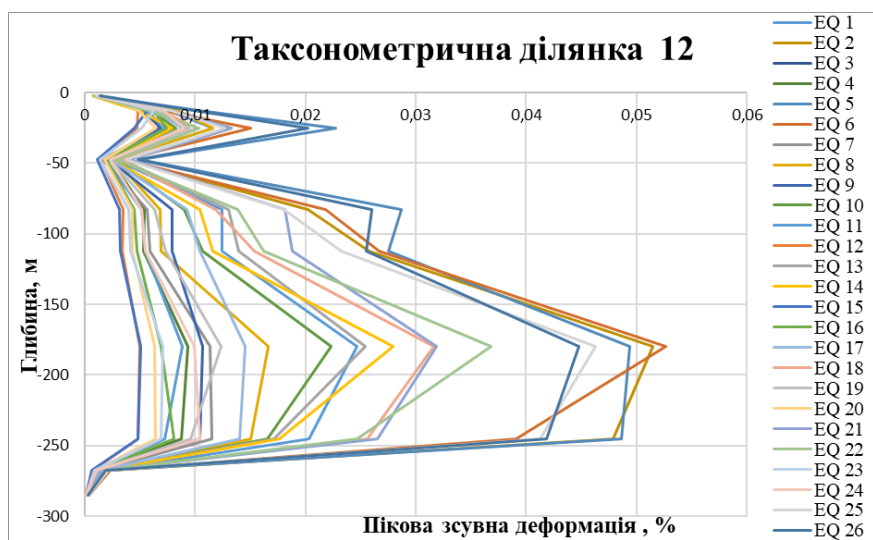


Рис. 5.32 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 12 для 26 входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

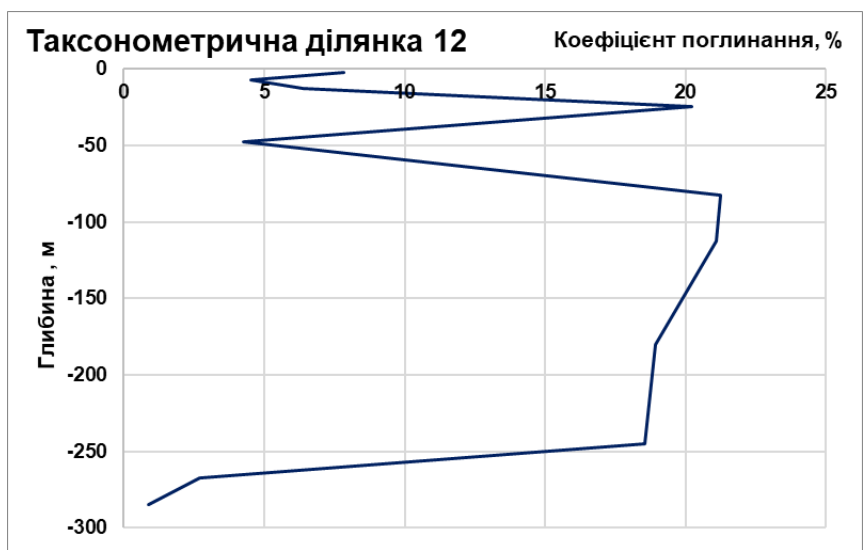


Рис. 5.33 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 12 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Рис. 5.32 – 5.33 демонструють, що в моделі таксонометричної ділянки № 12 в приповерхневому прошарку складеного пісками і пісковиками спостерігається різке збільшення максимального коефіцієнта поглинання D до 20,23% при цьому збільшення пікової зсувної деформації не призводить до порогових високих значень. PSS в цьому прошарку досягає 0,023%. Більші значення PSS відмічаються в нижніх шарах.

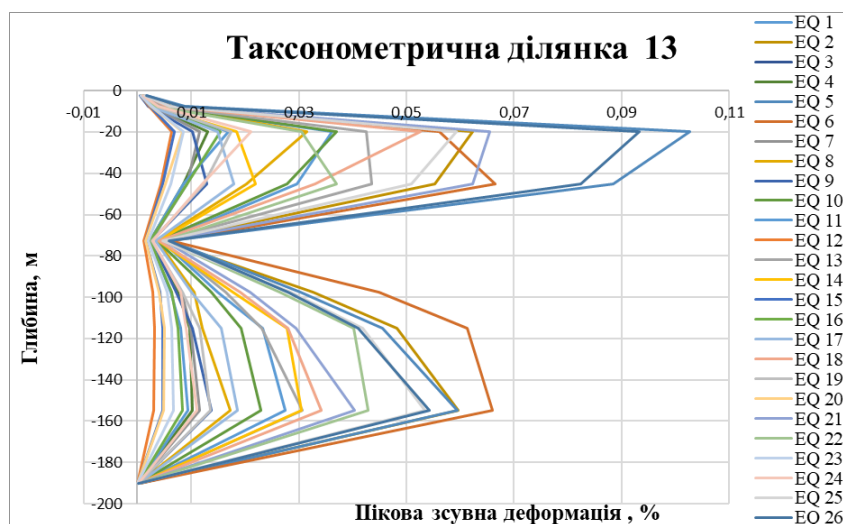


Рис. 5.34 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 13 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

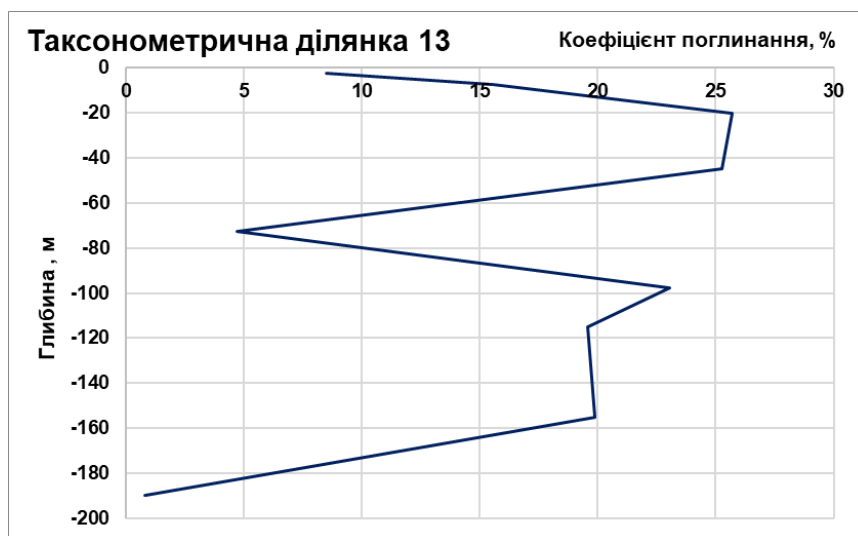


Рис. 5.35. Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 13 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки зміни максимального коефіцієнта поглинання D і пікової зсувної деформації PSS з глибиною таксонометричної ділянки № 13 характеризується найбільшими значеннями PSS до 0,1% і D до 25,5 в приповерхневих прошарках складених суглинком та піском флювіолімногляціальним, та пісками і пісковиками, розташованими на глибині від 10 до 60 м. Відмітимо, що різке збільшення PSS і D в прошарках складених цими ж породами і майже такої сумарної потужності спостерігається і в моделі таксонометричної ділянки №10.

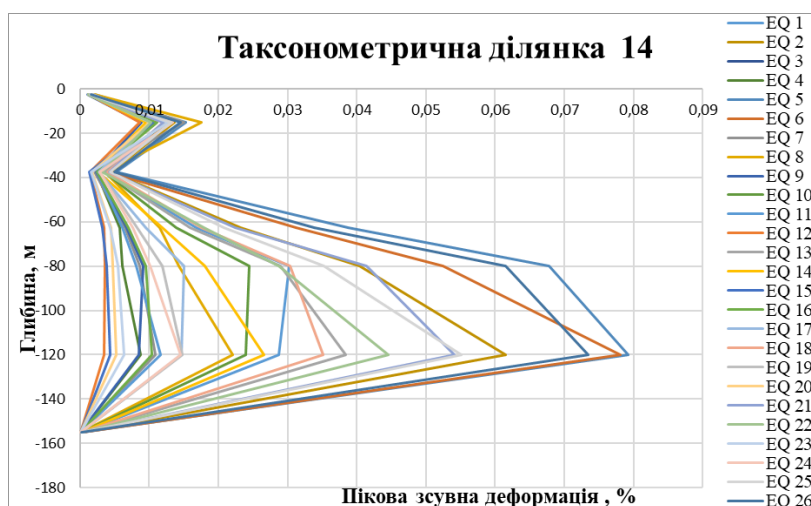


Рис. 5.36 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 14 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

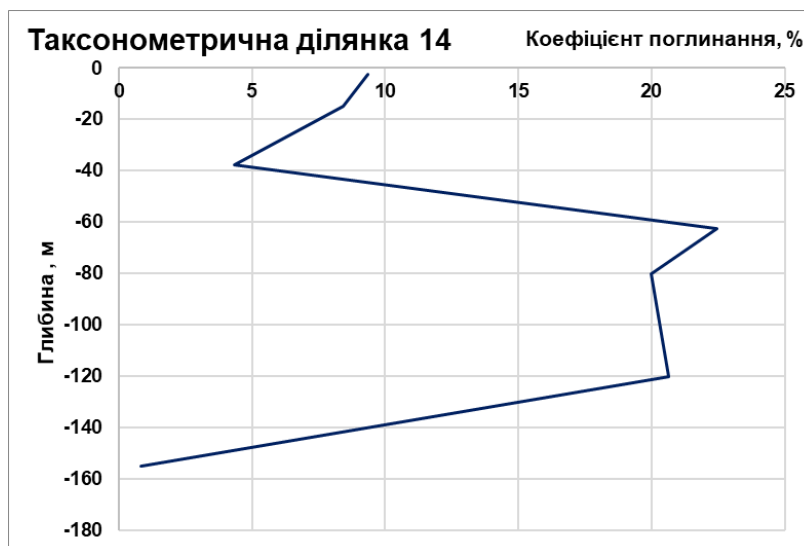


Рис. 5.37 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 14 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

Графіки зміни максимального коефіцієнта поглинання D і пікової зсувної деформації PSS з глибиною для таксонометричної ділянки № 14 демонструють, що найбільші значення $D = 22,47\%$ спостерігаються в прошарку складеному пісками зеленувато-сірими, глауконіто-кварцовими і розташованому на глибині від 50 м до 75 м. При цьому різкого зростання до порогових значень PSS в вказаному прошарку не спостерігається. Найбільші значення PSS спостерігаються в нижніх шарах

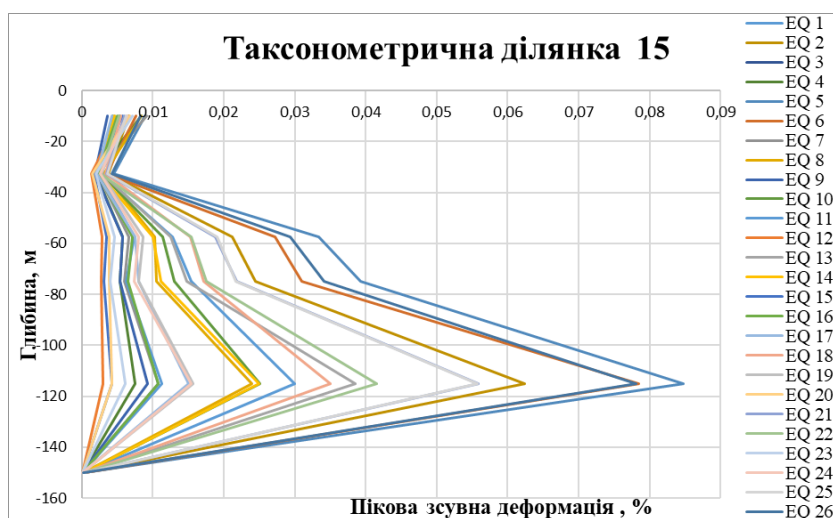


Рис. 5.38 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 15 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

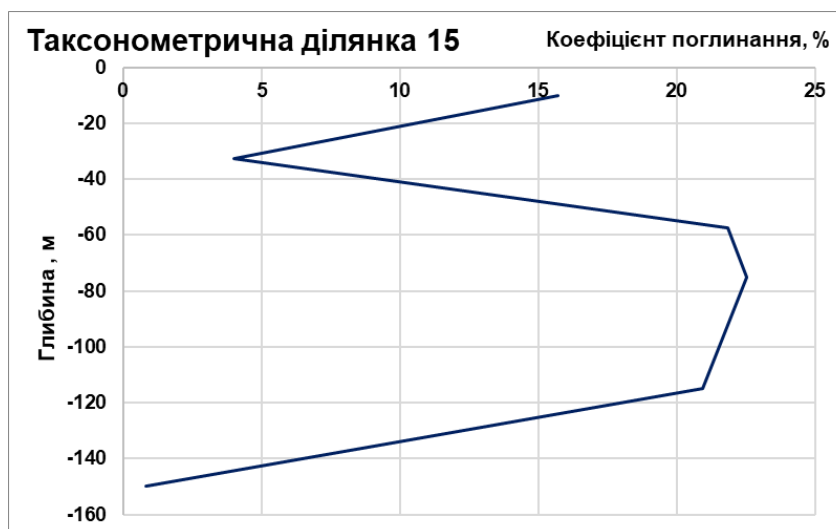


Рис. 5.39 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 15 для 26-ти вхідних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g

З рис. 5.38 – 5.39 зміни пікової зсувної деформації PSS і максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною видно, що в верхньому шарі, складеному піском алювіальним потужністю 20 м, D різко зростає до 15,73 %, при цьому скачкоподібного зростання PSS не спостерігається. Найбільші значення PSS = 0,085% спостерігаються в нижче залягаючому шарі глини і алевролітів, який підстиляється діоритами із значно більшими значеннями акустичної жорсткості.

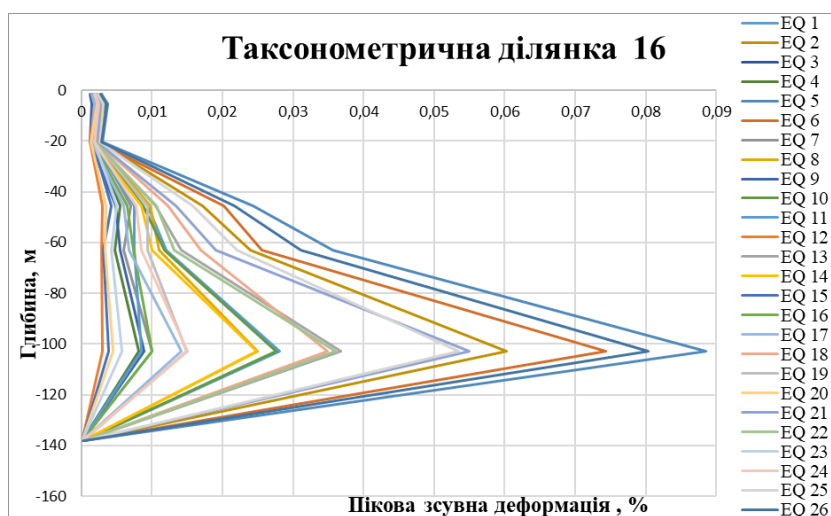


Рис. 5.40 Графіки зміни пікової зсувної деформації PSS з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 16 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g.

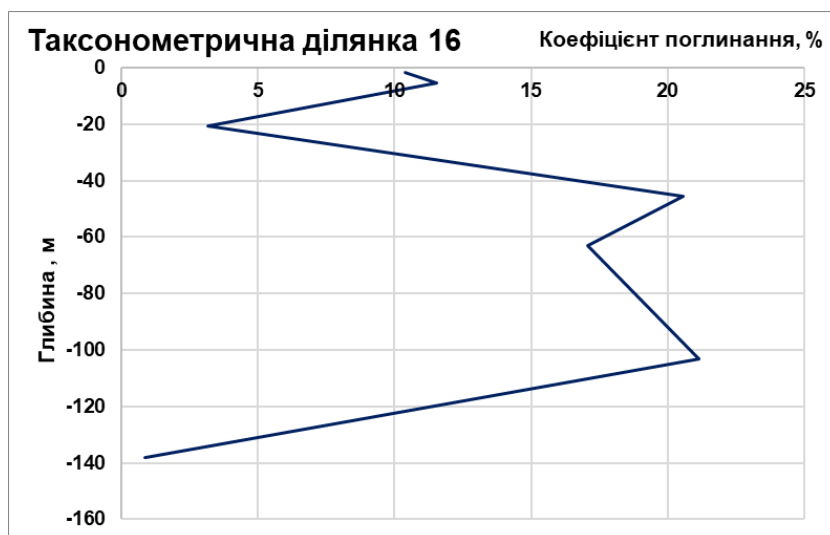


Рис. 5.41 Зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 16 для 26-ти входних сейсмічних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g.

Рис. 5.40 – 5.41 демонструють, що найбільші значення $PSS = 0,089\%$ і $D = 21,13\%$ в моделі таксонометричної ділянки № 16 спостерігаються в прошарку глини і алевролітів (після контрастної межі акустичних жорсткостей між шарами). Високі значення D також спостерігаються і в вищезалігаючих шарах без паралельного зростання PSS . Відмітимо, що в розрізі присутній пісок алювіальний і пісок озерно-болотяний, які при більшій потужності характеризуються високими значеннями PSS . Однак в моделі таксонометричної ділянки № 16 за рахунок малих потужностей (до 5 м) характеризуються лише збільшеними значеннями D .

Проаналізувавши зміну пікової зсувної деформації PSS і максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною у моделях 16-ти таксонометричних ділянок, показує, що з геологічної точки зору, сейсмогеологічні моделі (див. Табл. 5.1 ÷ 5.16) досліджуваних ділянок № 1 ÷ № 16 хоча і мають схожі ґрунтові умови, однак максимумами зсувної деформації і максимального коефіцієнта поглинання для них помітно відрізняються як за величиною так і за глибиною залягання максимумів. Слід також відмітити типи ґрунтів, для яких, при певному розташуванні шарів по глибині і певній їх потужності, проявляються як сейсмічно слабкі прошарки з високими значеннями пікової зсувної деформації PSS . Серед таких ґрунтів відмітимо моренні відклади та супісок в при поверхневому заляганні і потужністю від 10 м. В моделі таксонометричної ділянки 2 пікова зсувна деформація склала $0,173\%$. В якості «сейсмічно слабких шарів» проявились прошарки складені піском алювіальним при потужності від 30 м. При менших значеннях потужності спостерігаються високі значення максимального коефіцієнта поглинання D , проте без високих значень деформації зсуву.

5.4.2. Зміна з глибиною пікового прискорення ґрунту

На рис. 5.42 ÷ 5.57 представлено графіки зміни пікового прискорення ґрунту PGA з глибиною (від кристалічного фундаменту до вільної поверхні) в моделях 16-ти досліджуваних таксонометричних ділянок при проходженні 26-

ти вхідних рухів з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g..

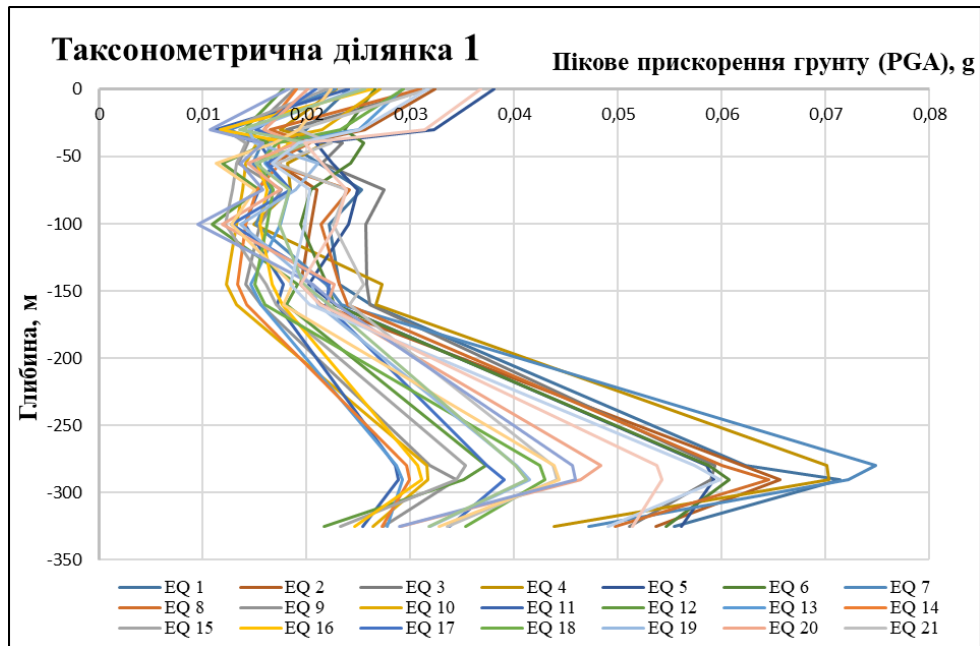


Рис. 5.42 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуючих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 1

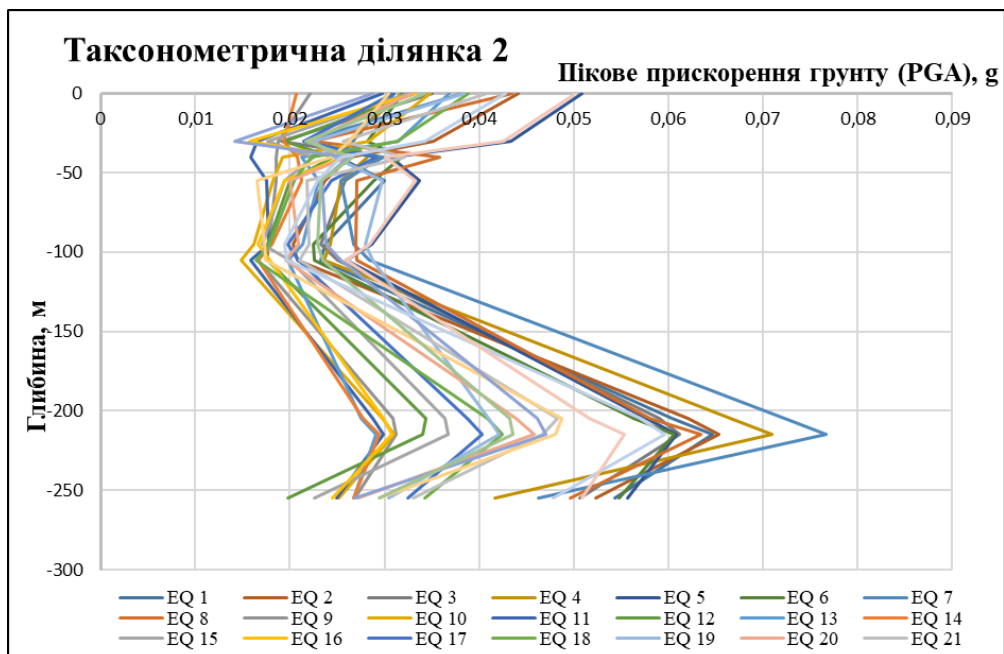


Рис. 5.43 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуючих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 2

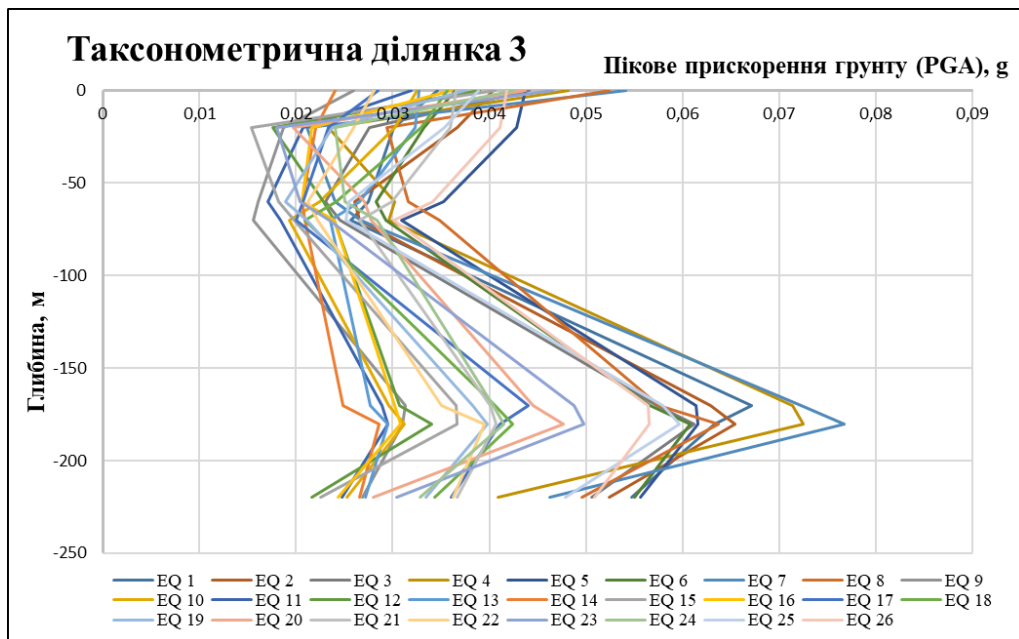


Рис. 5.44 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 3

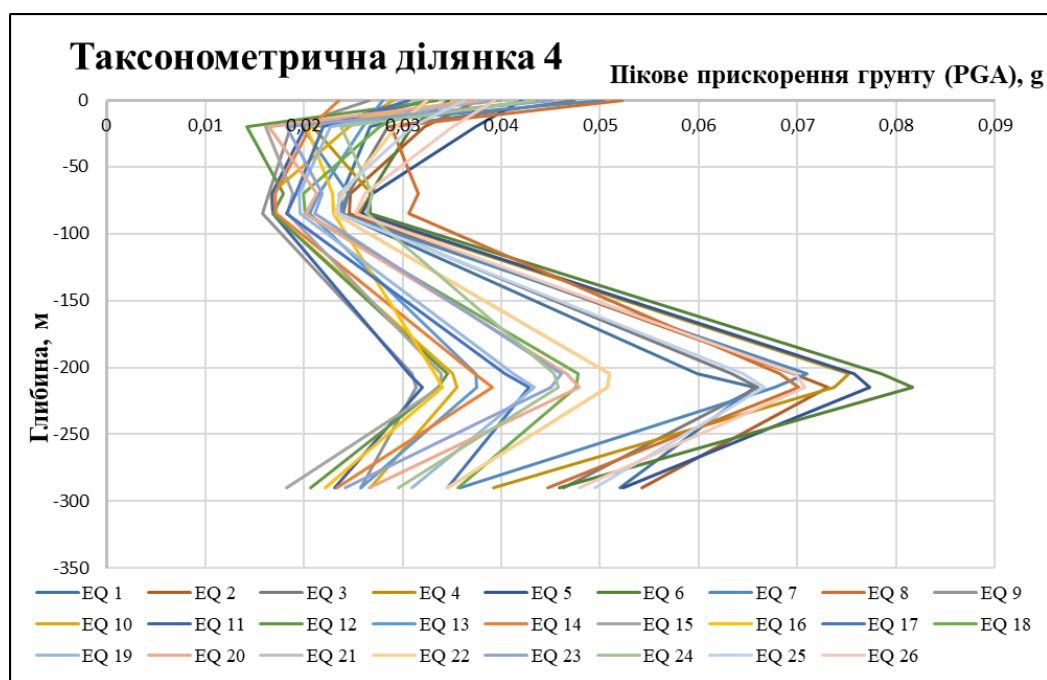


Рис. 5.45 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 4

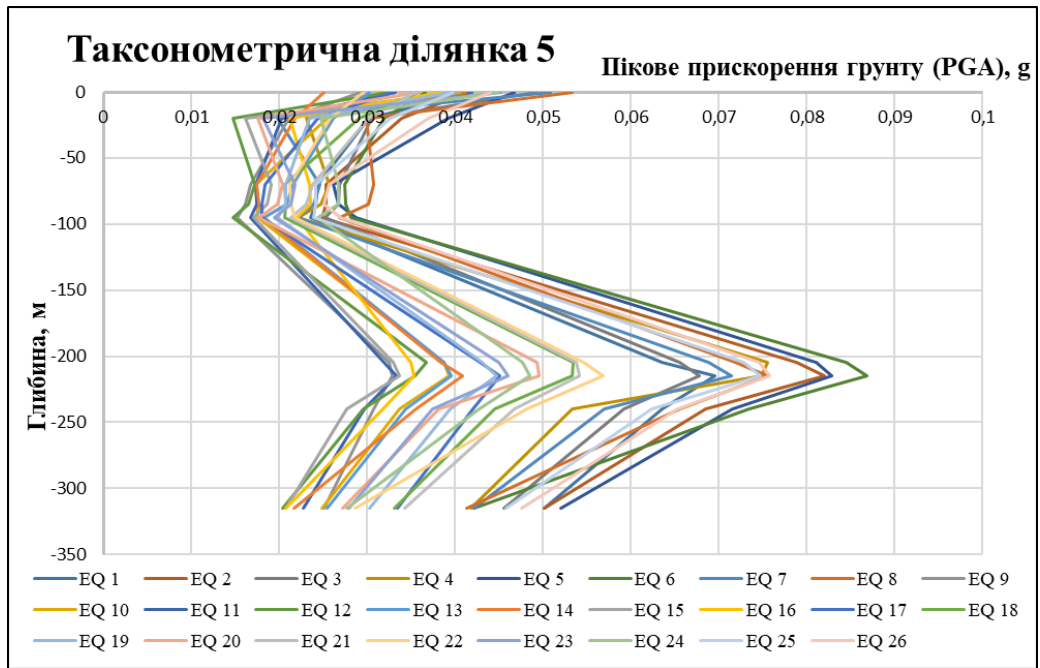


Рис. 5.46 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуючих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 5

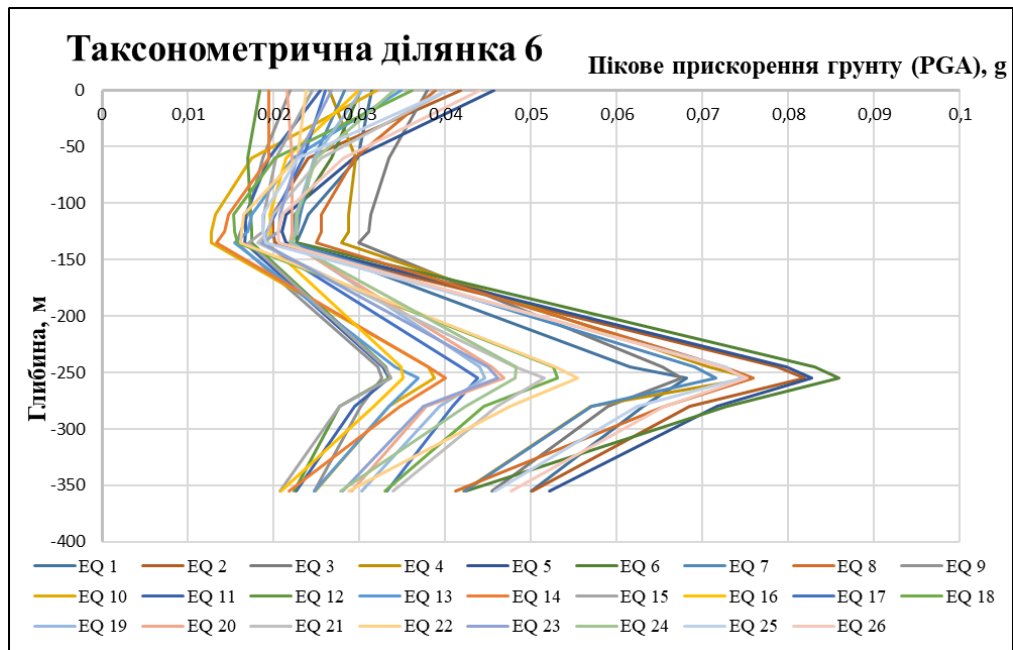


Рис. 5.47 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуючих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 6

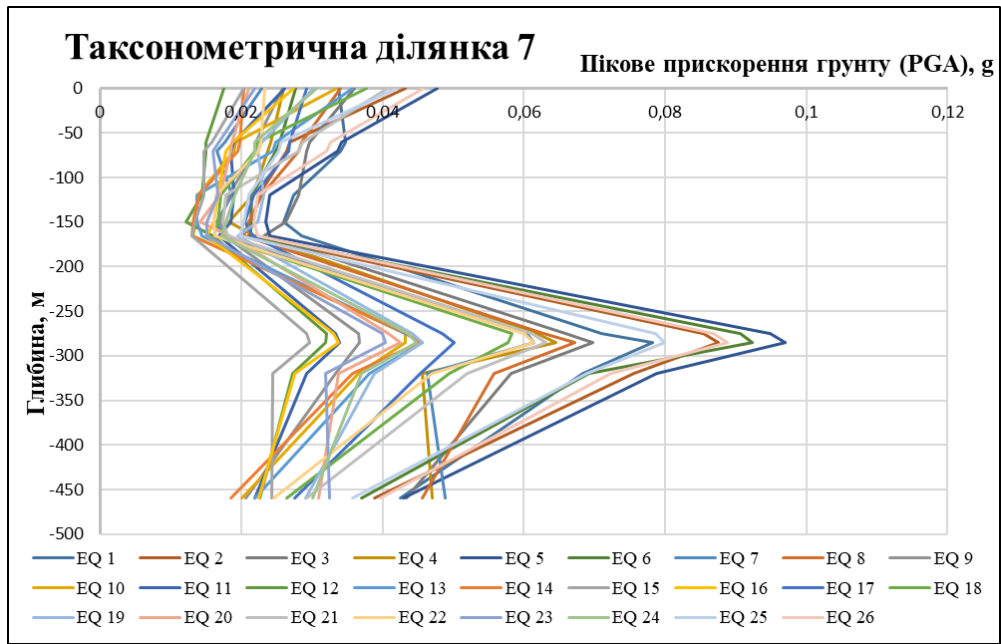


Рис. 5.48 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 7

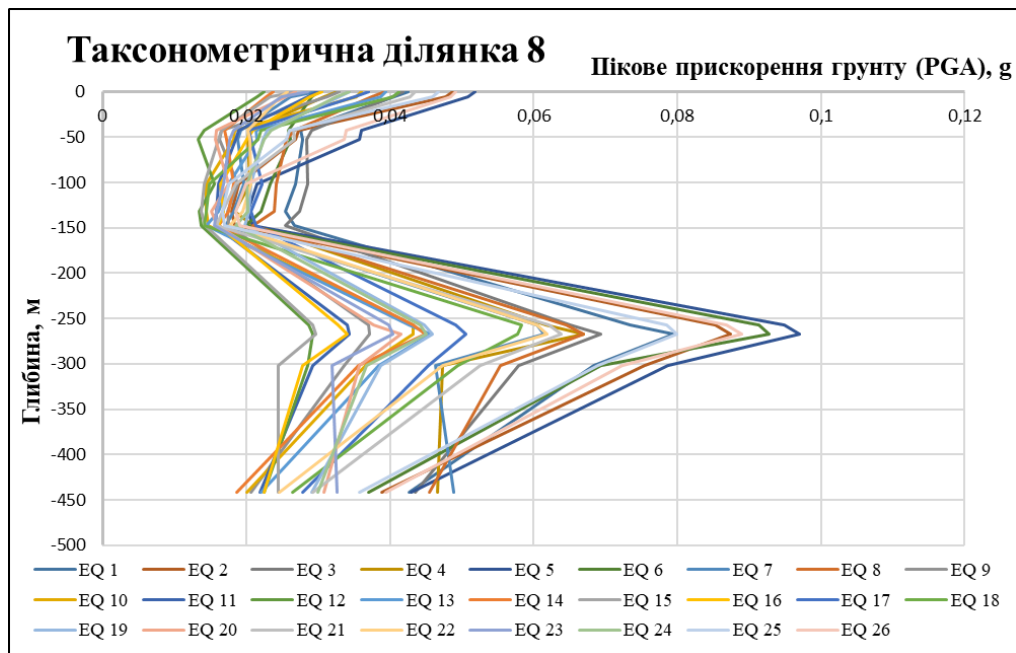


Рис. 5.49 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 8

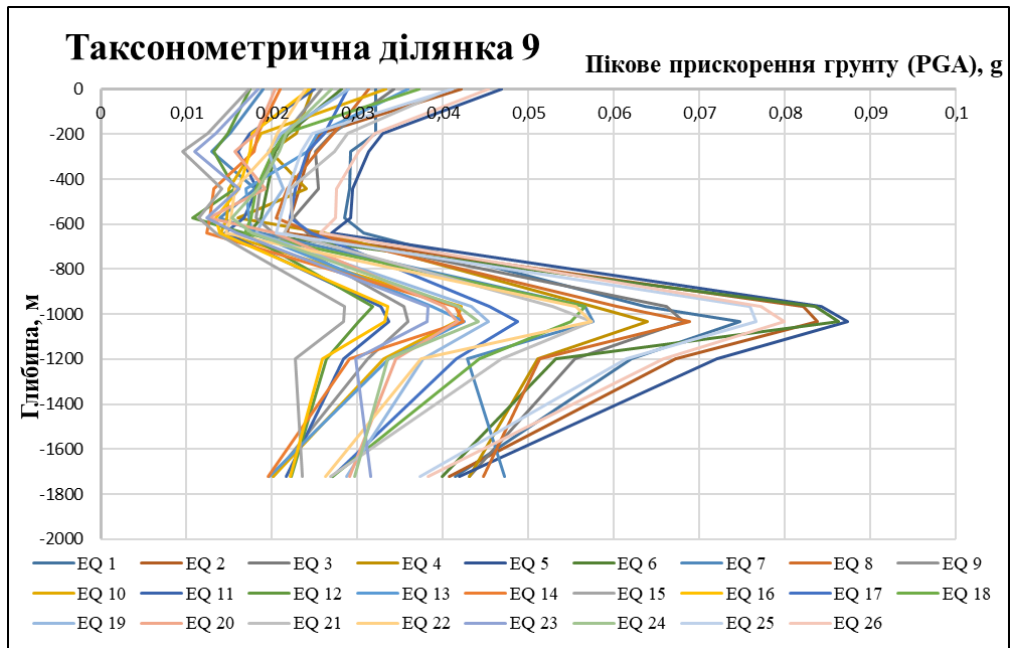


Рис. 5.50 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки №9

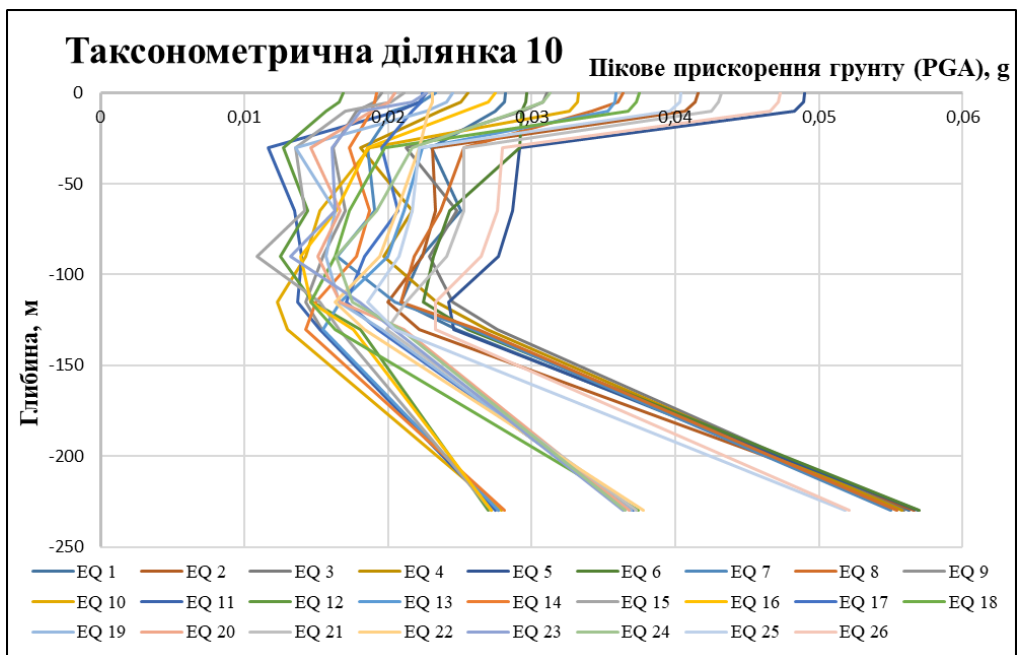


Рис. 5.51 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки №10

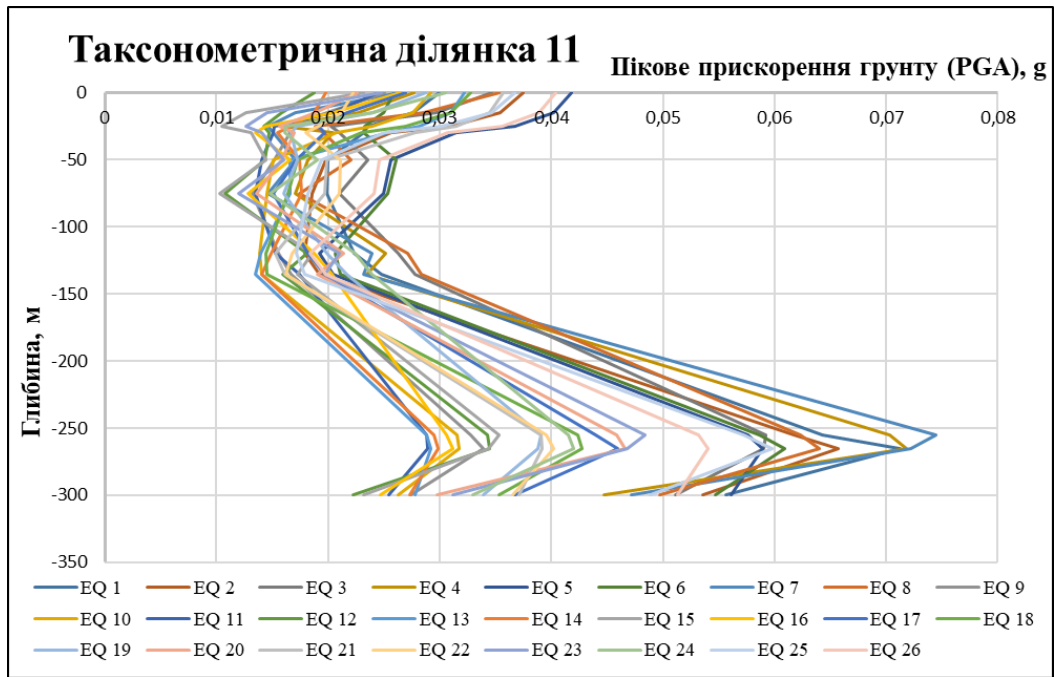


Рис. 5.52 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 11

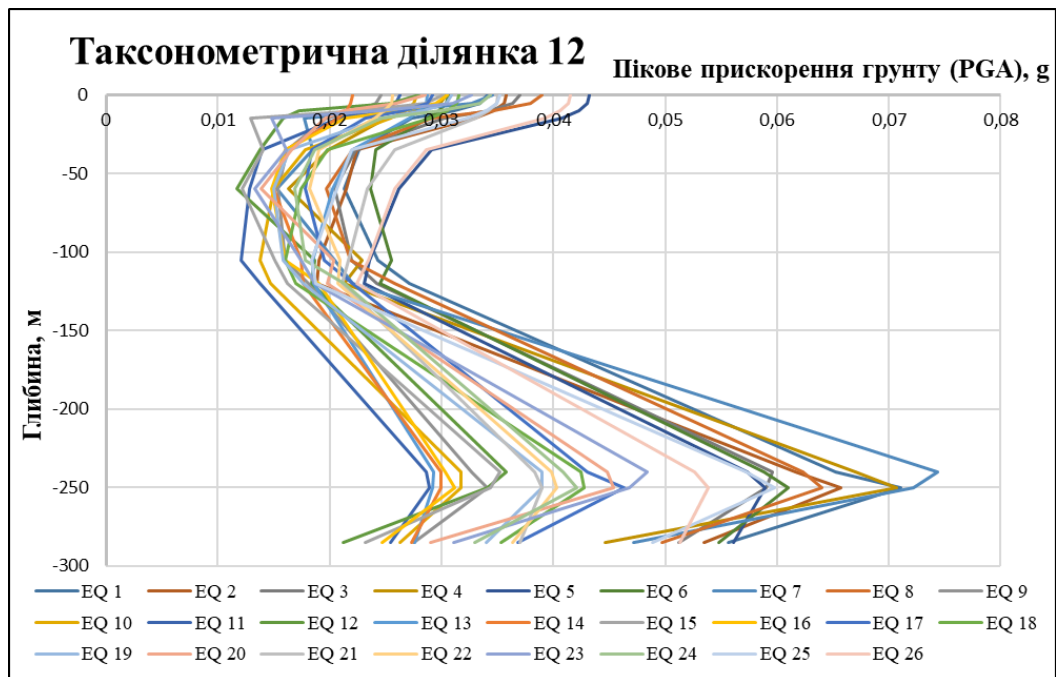


Рис. 5.53 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 12

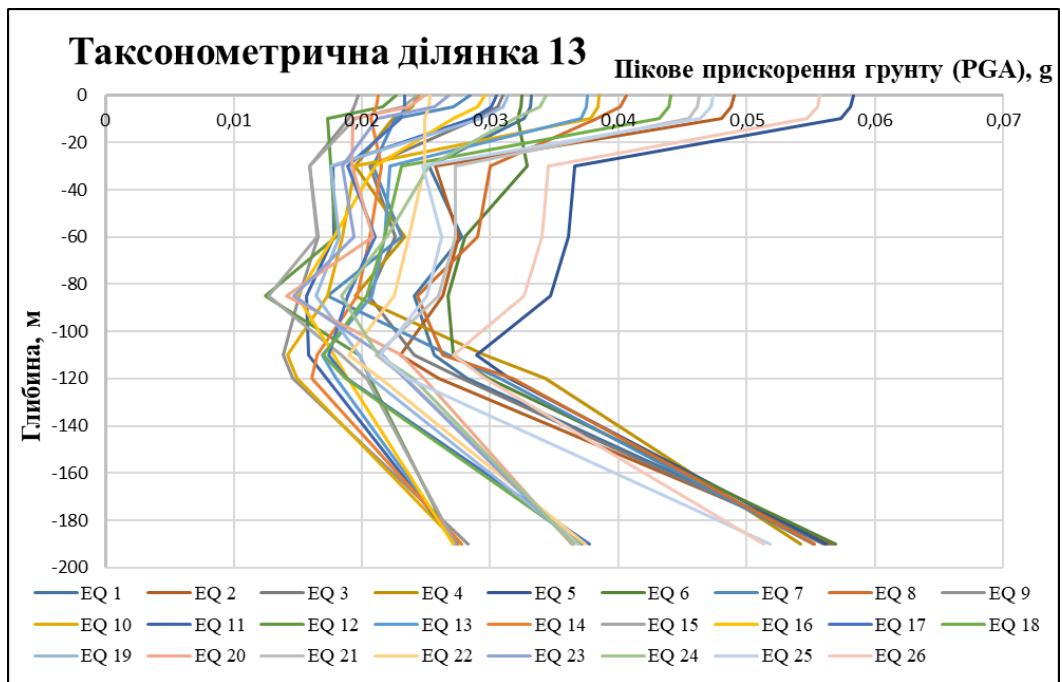


Рис. 5.54 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 13

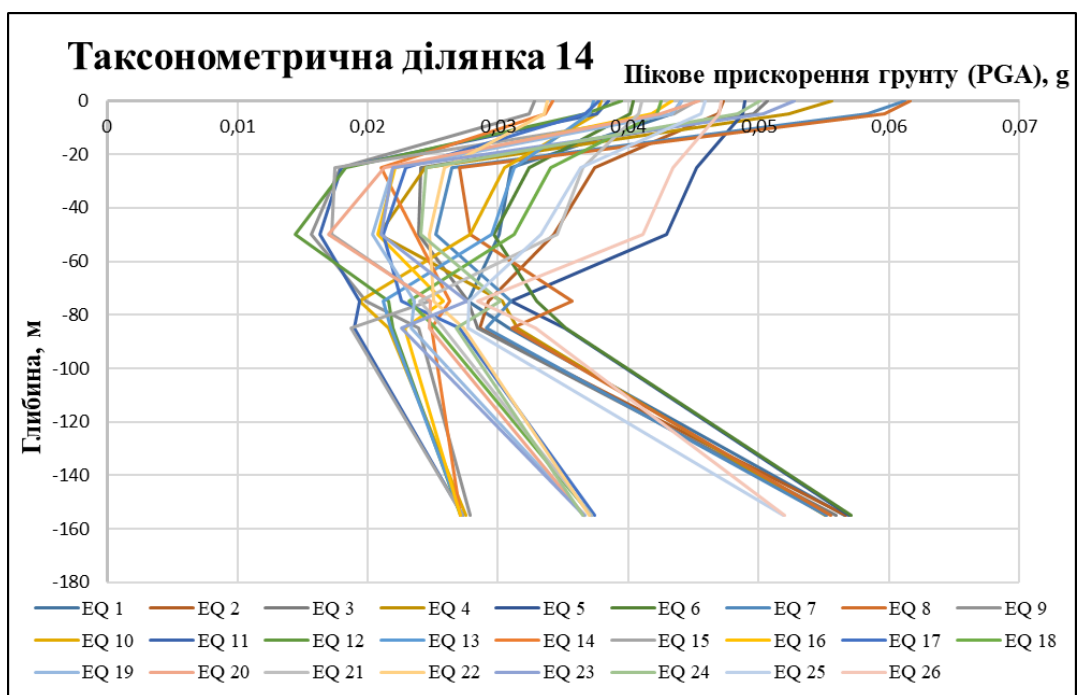


Рис. 5.55 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 14

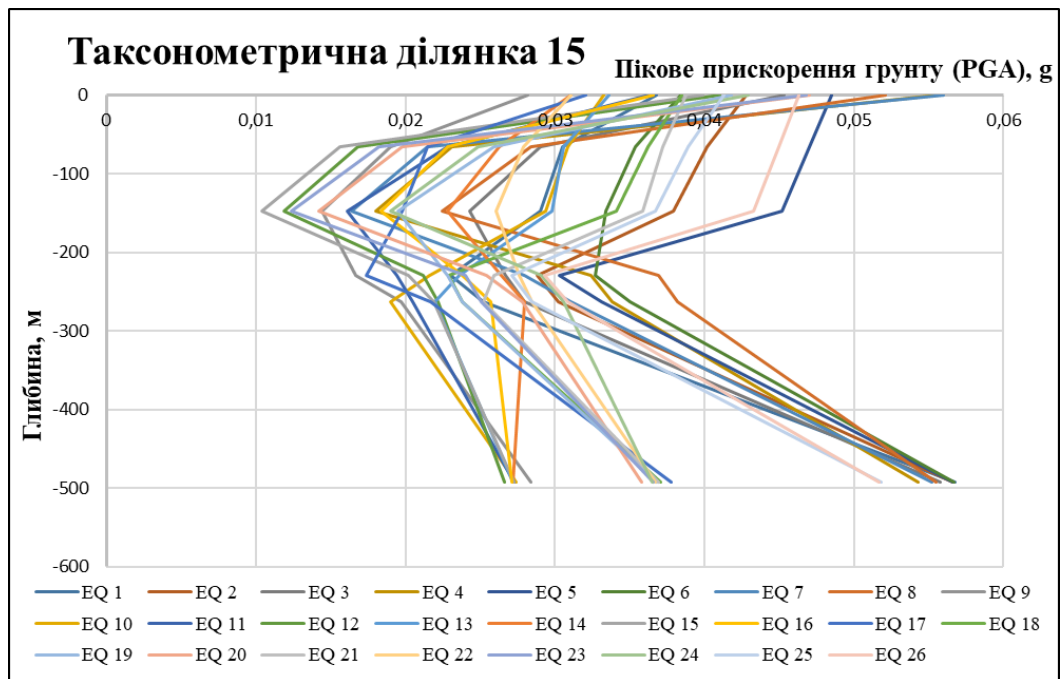


Рис. 5.56 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 15

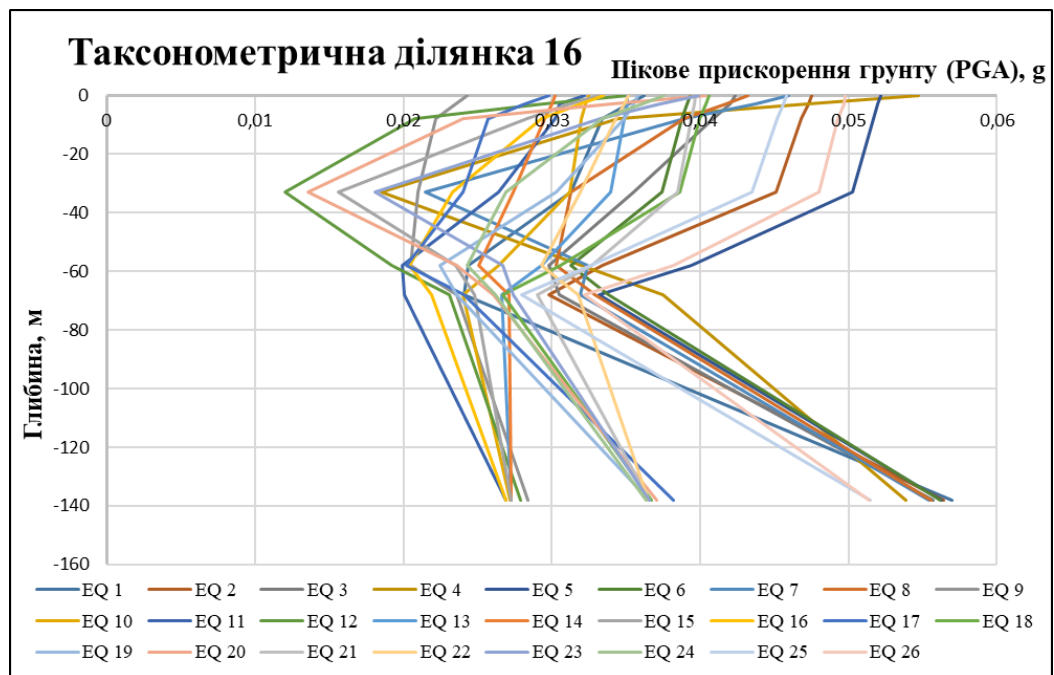


Рис. 5.57 Графіки зміни PGA з глибиною для 26 зондуєчих сейсмічних рухів в моделі таксонометричної ділянки № 16

Графіки зміни PGA з глибиною, представлені на рис. 5.42 – 5.57 демонструють, різке збільшення PGA із зменшенням глибини ближче до

поверхні. При тому, значення PGA при поширенні сейсмічних хвиль від корінної породи до поверхні то збільшувалися, то зменшувалися, а у верхніх 10-50 м у всіх моделях спостерігається збільшення. Збільшення прискорень поблизу поверхні Землі головним чином пояснюється зменшенням швидкості поперечної хвилі при зменшенні глибини, контрастом імпедансу (сейсмічної жорсткості) в поверхневому ґрунті та нульових зсувних напруженнях на поверхні ґрунту, що призводить до переходу потенційної енергії сейсмічних коливань у кінетичну. Рис. 5.42 – 5.57 демонструють, що найбільше значення PGA у верхньому шарі спостерігається в моделі таксонометричної ділянки № 14 . Воно становить 0,062g, найменше значення PGA на поверхні в сейсмогеологічній моделі таксонометричної ділянки № 1 складає 0,038 g.

В Таблиці 5.18 наведено розраховані значення пікових прискорень PGA, пікових швидкостей PGV і пікових зміщень PGD для кожної таксонометричної ділянки.

Таблиця 5.18

Розраховані значення пікових прискорень PGA, пікових швидкостей PGV і пікових зміщень PGD для кожної таксонометричної ділянки

Таксонометрична ділянка	PGA, g	PGV, m/sec	PGD, m
1	0,038	0,119	0,075
2	0,051	0,147	0,087
3	0,054	0,141	0,072
4	0,052	0,126	0,084
5	0,053	0,126	0,087
6	0,046	0,132	0,073
7	0,048	0,123	0,087
8	0,052	0,123	0,068
9	0,047	0,188	0,100
10	0,049	0,143	0,094
11	0,042	0,119	0,073
12	0,043	0,117	0,074
13	0,058	0,163	0,075
14	0,062	0,154	0,074
15	0,056	0,155	0,072
16	0,055	0,163	0,071

На рис. 5.58 представлено побудовану карту розподілу розрахункових пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні ґрунтової товщі території Києва при максимальних прогнозованих сейсмічних впливах до 0,06g.

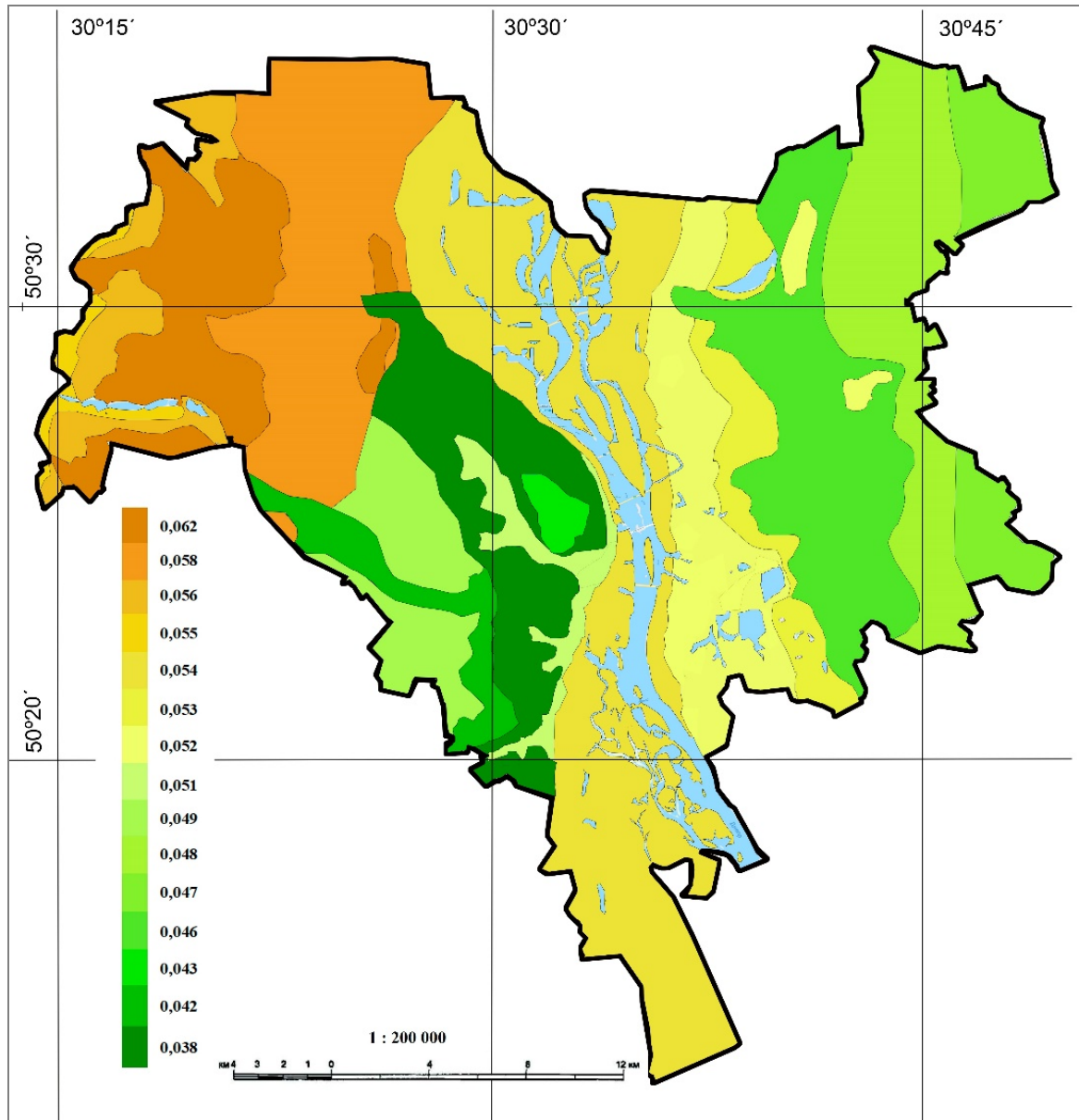


Рис. 5.58 Карта розподілу розрахункових пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні території Києва при максимальних сейсмічних впливах до 0,06g

З рис. 5.58 видно, що при сейсмічних впливах з максимальною амплітудою вхідних коливань 0,06g, PGA на вільній поверхні в межах території Києва буде змінюватись в межах від 0,038g (таксонометрична ділянка №1) до

0,062g (таксонометрична ділянка №14). За розподілом значень пікових прискорень ґрунту на карті сейсмічного зонування території Києва в результаті виділено 15 ділянок, хоча попередньо було виділено 16. На двох таксонометричних ділянках в результаті моделювання відгуку ґрунтової товщі на сейсмічні впливи нормовані по амплітуді коливань до 0,06g отримано однакові величини пікового прискорення ґрунту PGA.

Колівання ґрунту з більшими значеннями PGA, як правило, вважаються більш руйнівними ніж сейсмічні коливання з меншими піковими прискореннями. Однак дуже високі значення PGA, які тривають короткий проміжок часу і характеризуються високими частотами, не можуть нанести значну шкоду багатьом типам протяжних об'єктів і конструкцій з низькими власними частотами коливань. Слід мати на увазі, що з інженерної точки зору високе значення PGA може не представляти інтересу в випадку одиничного викиду великої амплітуди, або коли частота коливання з високим значенням PGA знаходиться за межами власних частот коливань будівлі. Тому, при інтерпретації результатів досліджень, необхідно враховувати спектральний склад сейсмічних коливань.

5.5. Амплітудні спектри Фур'є прискорень поверхні ґрунтової товщі таксонометричних ділянок Києва

На рис. 5.59 – 5.74 представлено амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту вільної поверхні досліджуваних таксонометричних ділянок Києва, при їх зондуванні 26-ма сейсмічними впливами з максимальною амплітудою падаючої хвилі від 0,01g до 0,06g.

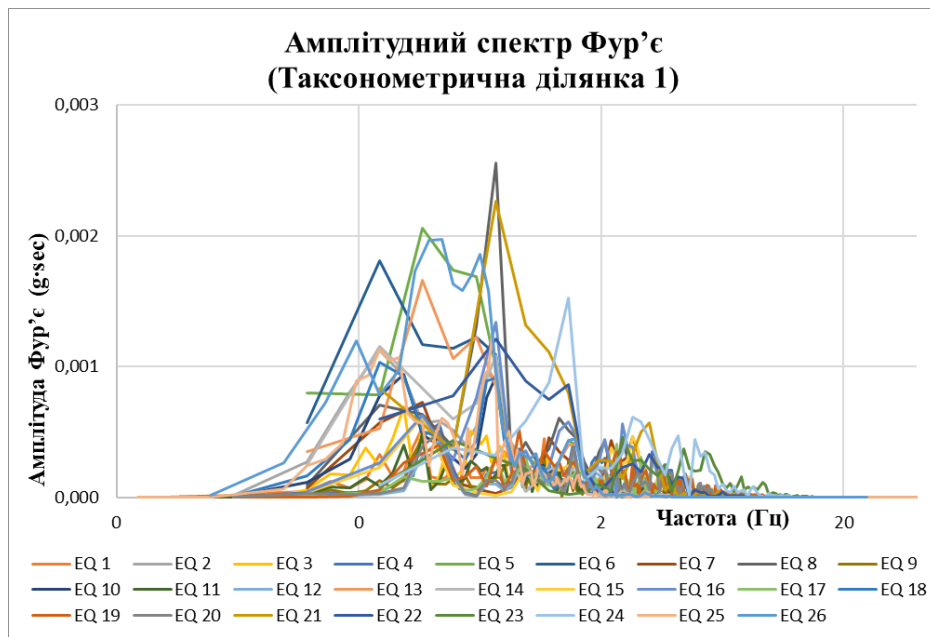


Рис. 5.59 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 1 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

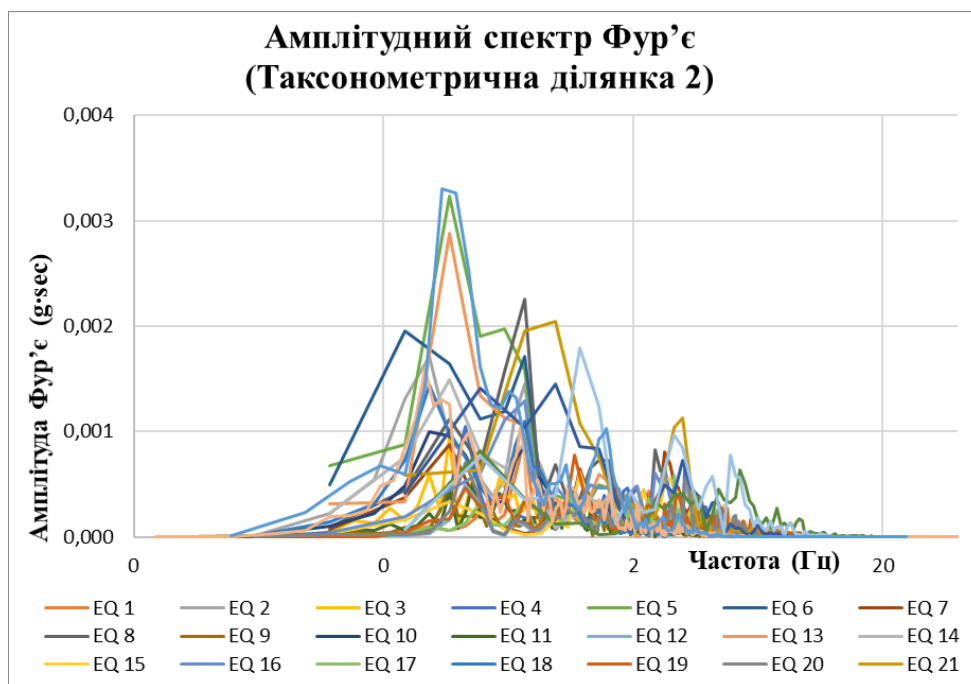


Рис. 5.60 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 2 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

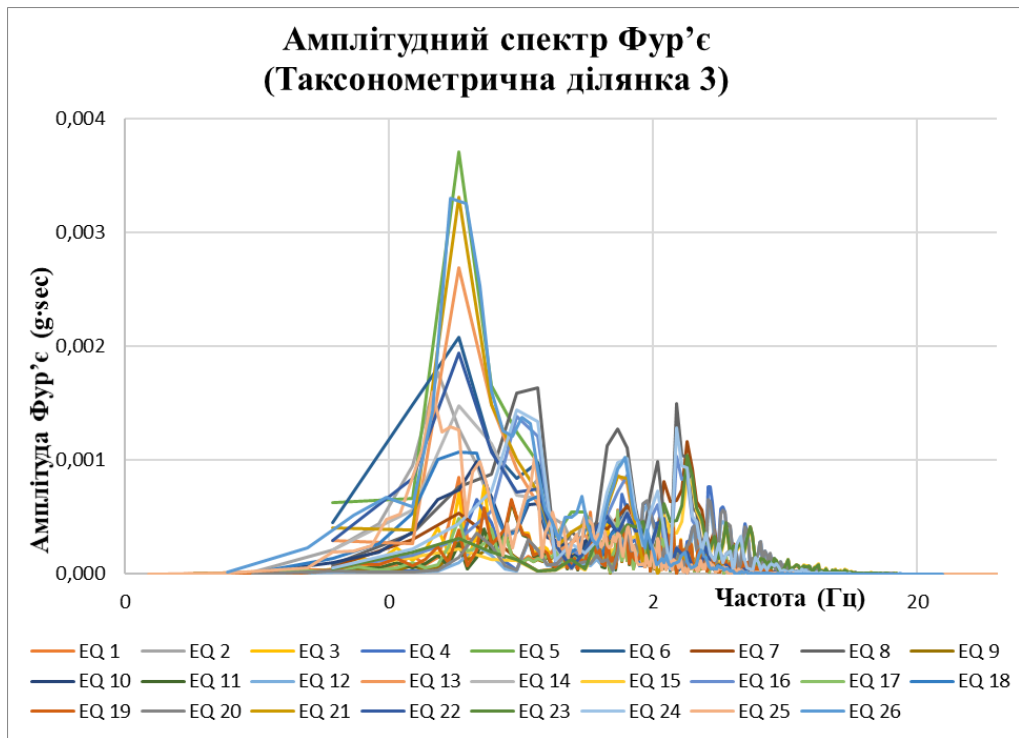


Рис. 5.61 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 3 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

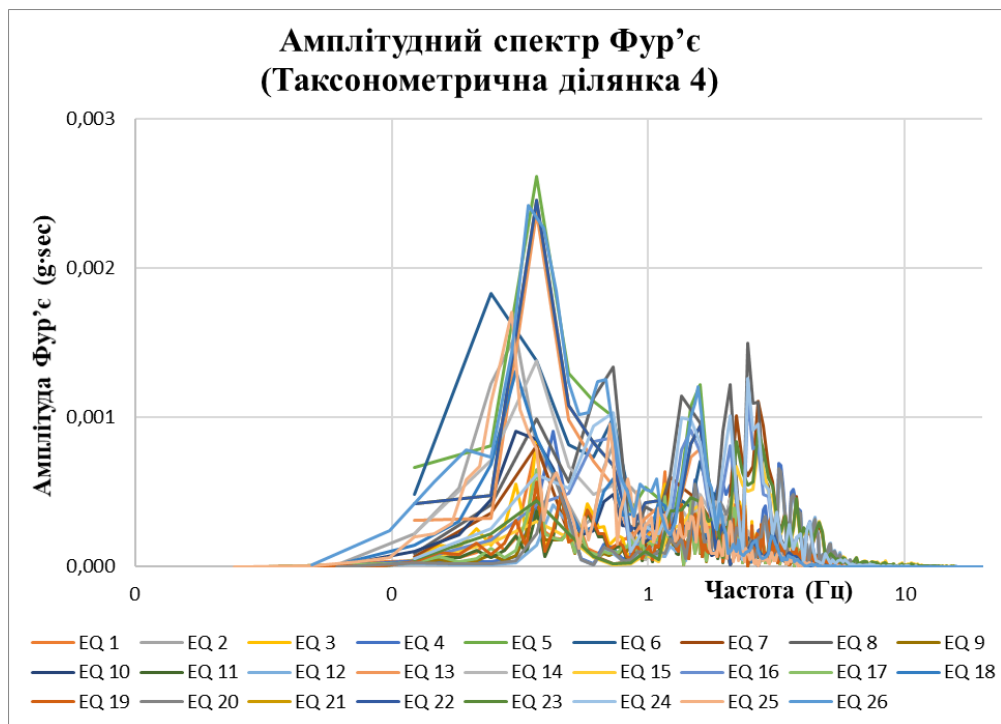


Рис. 5.62 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 4 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

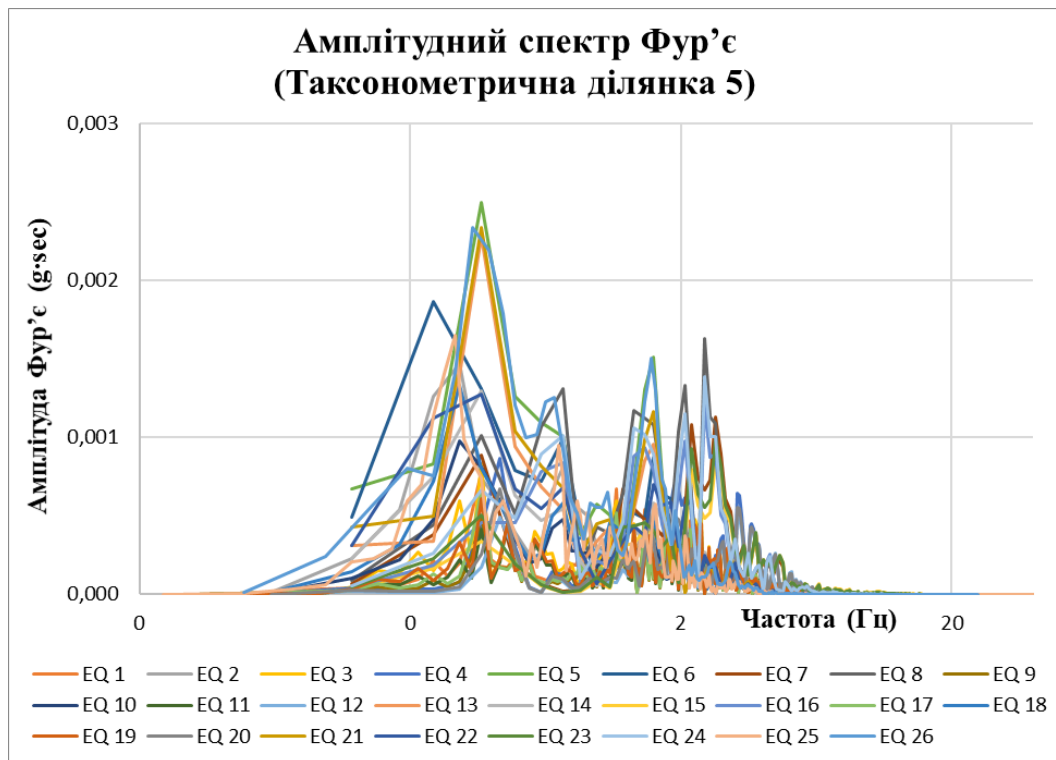


Рис. 5.63 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 5 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

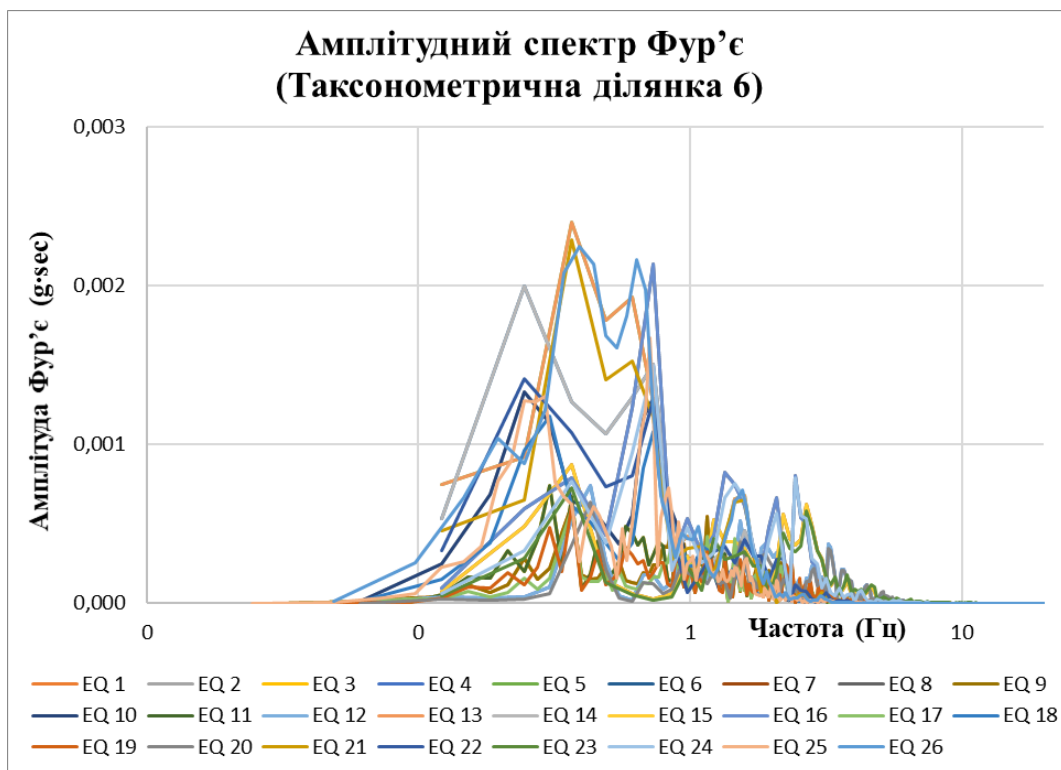


Рис. 5.64 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 6 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

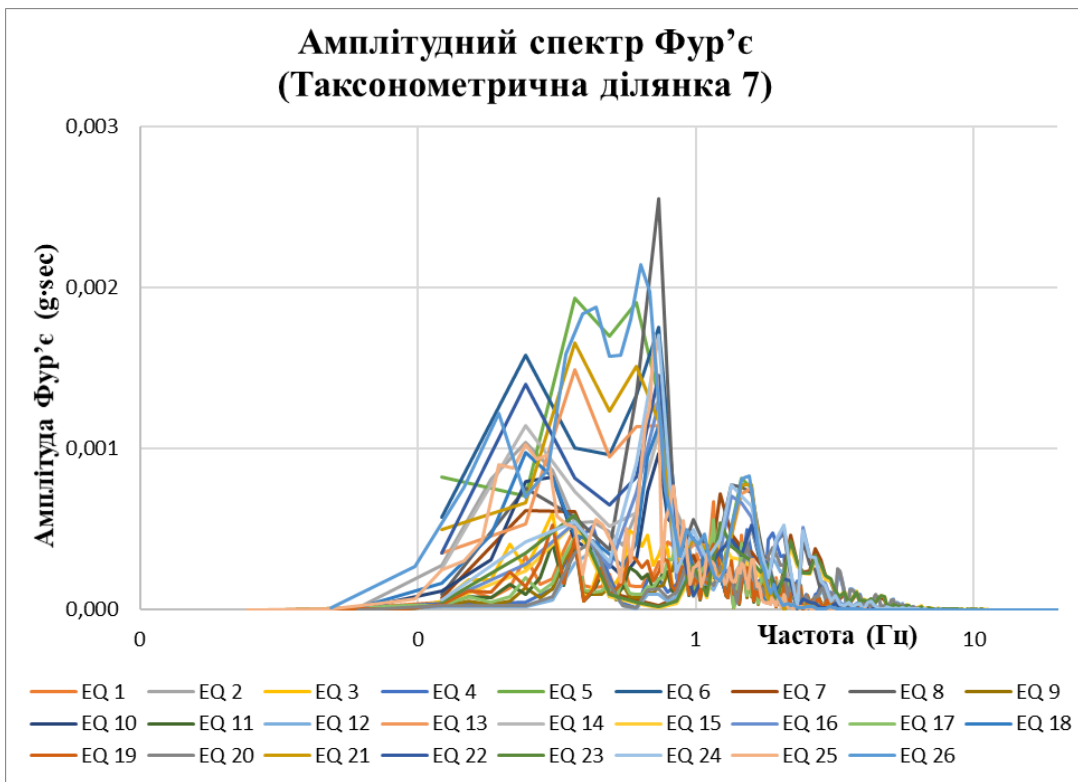


Рис. 5.65 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 7 як результат її зондування 26-ма сейсмічними впливів

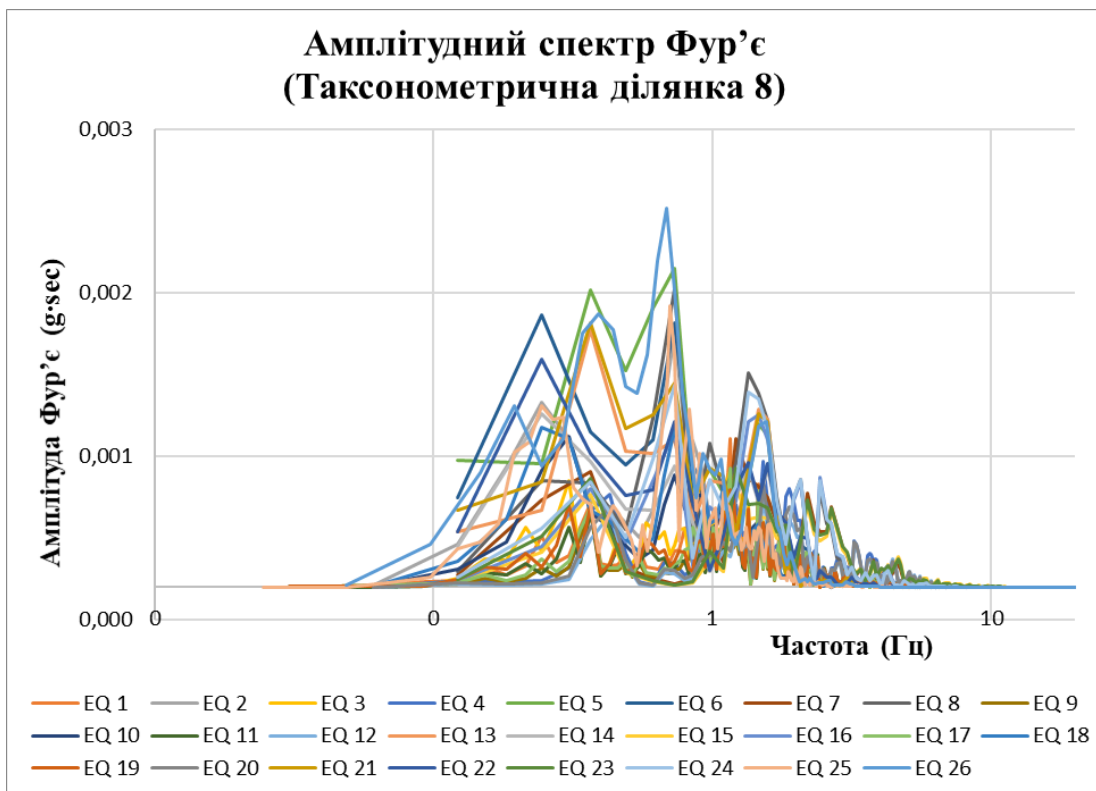


Рис. 5.66 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 8 як результат її зондування 26-ма сейсмічними впливів

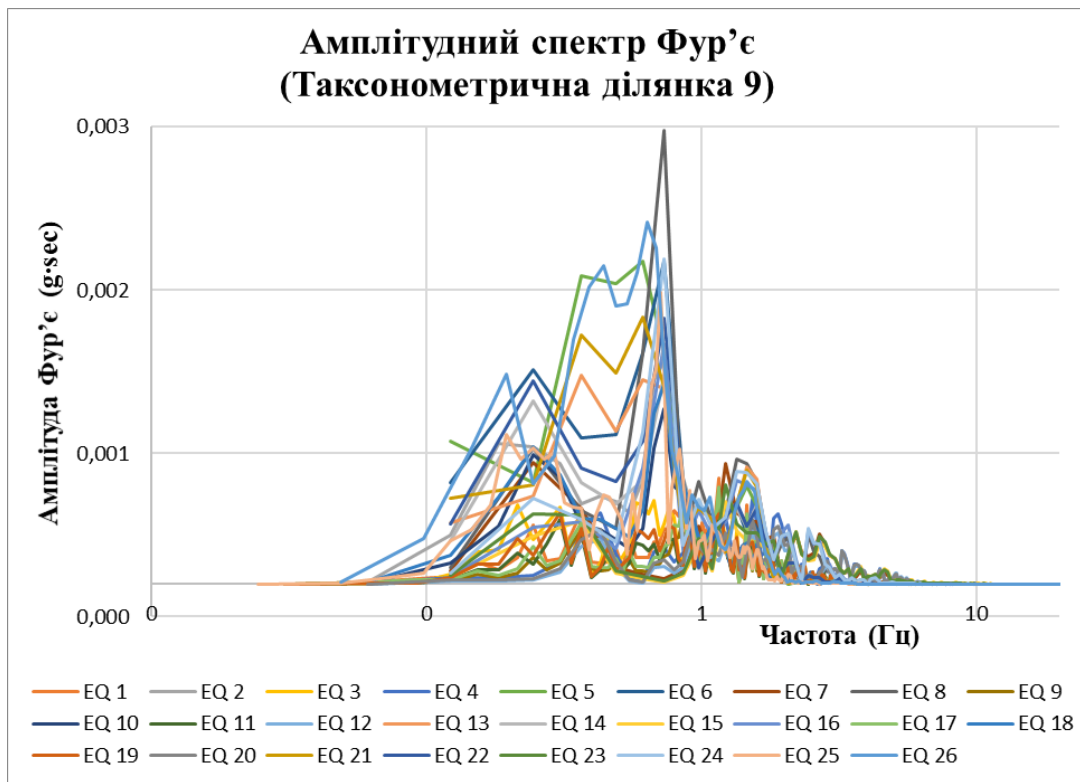


Рис. 5.67 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 9 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

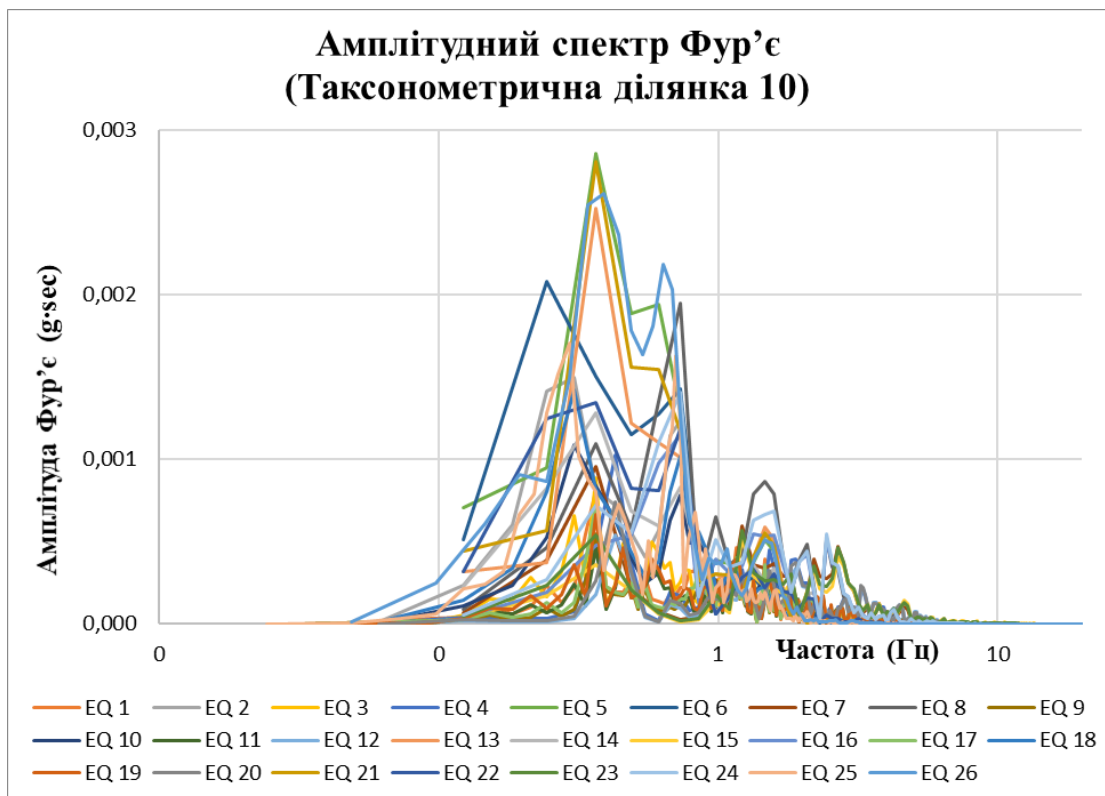


Рис. 5.68 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 10 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

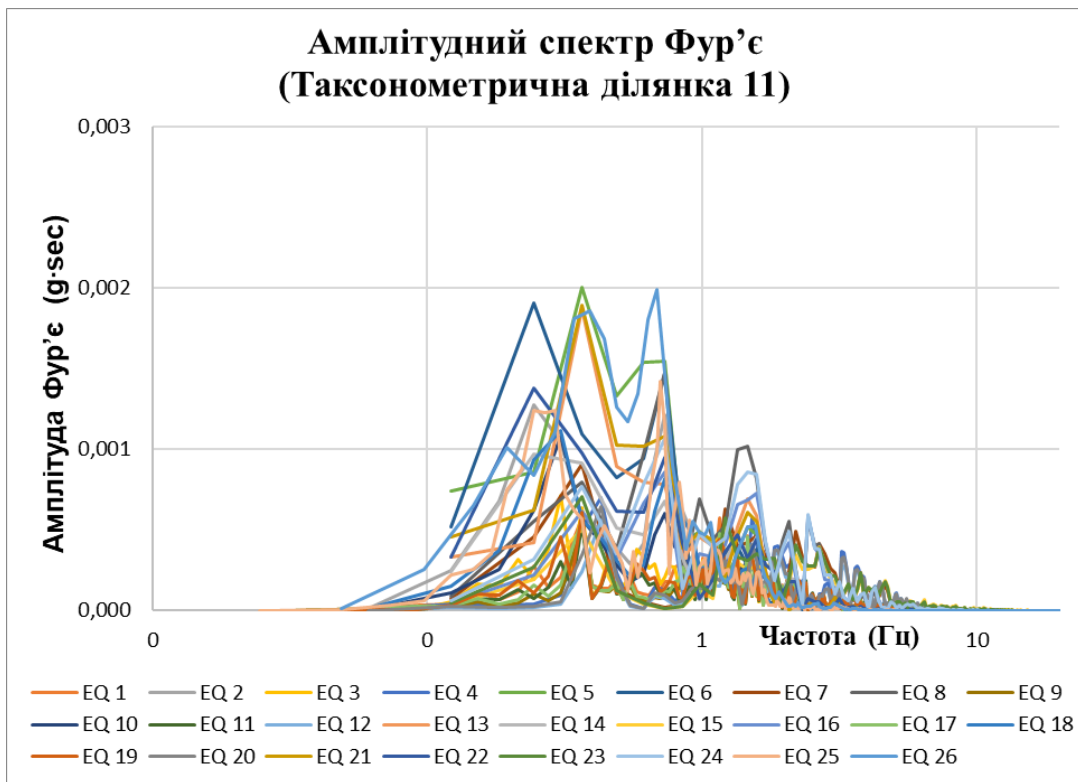


Рис. 5.69 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 11 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

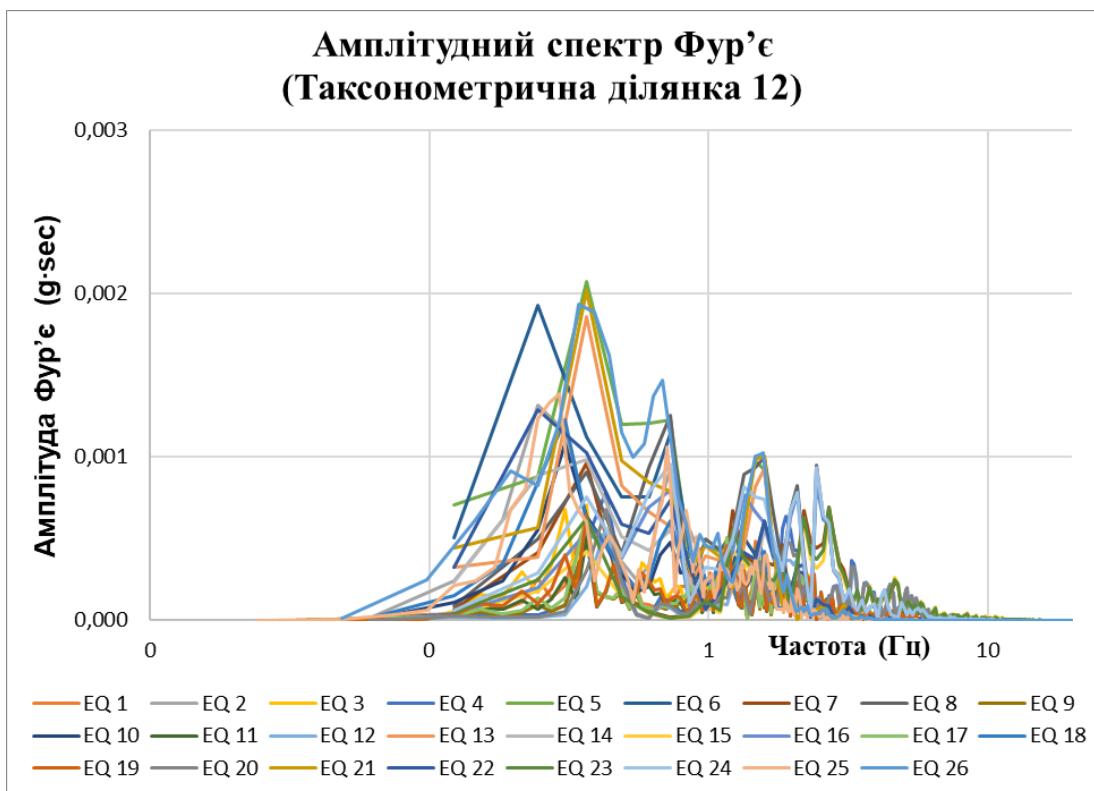


Рис. 5.70 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 12 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

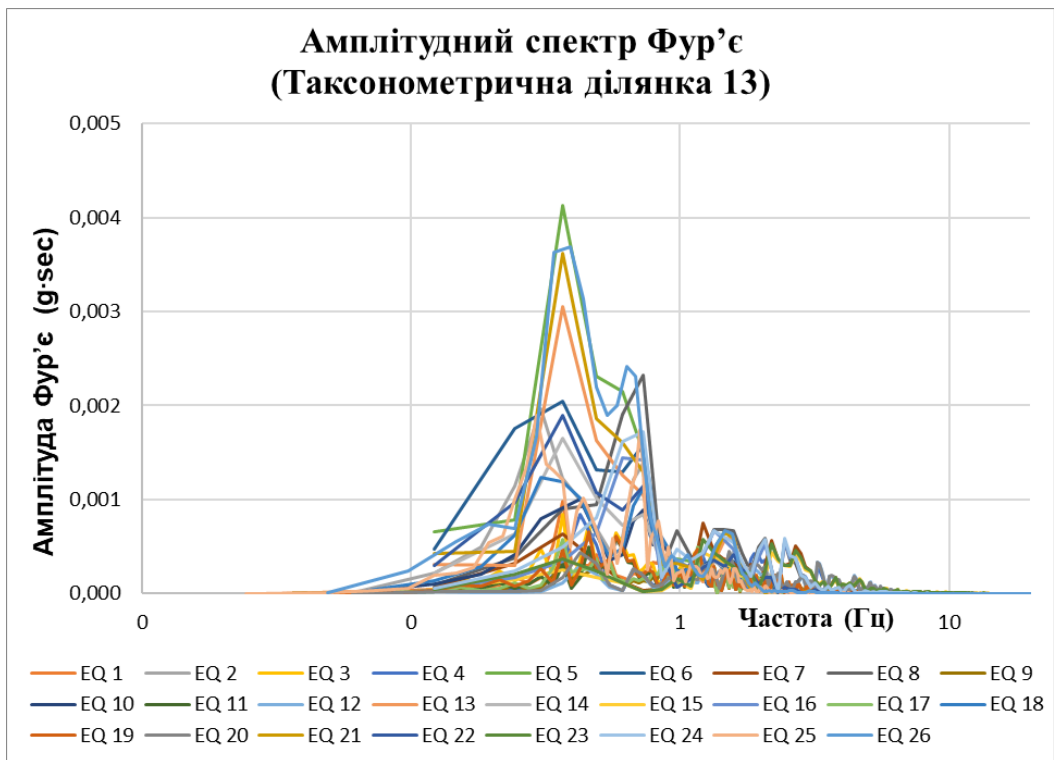


Рис. 5.71 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 13 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

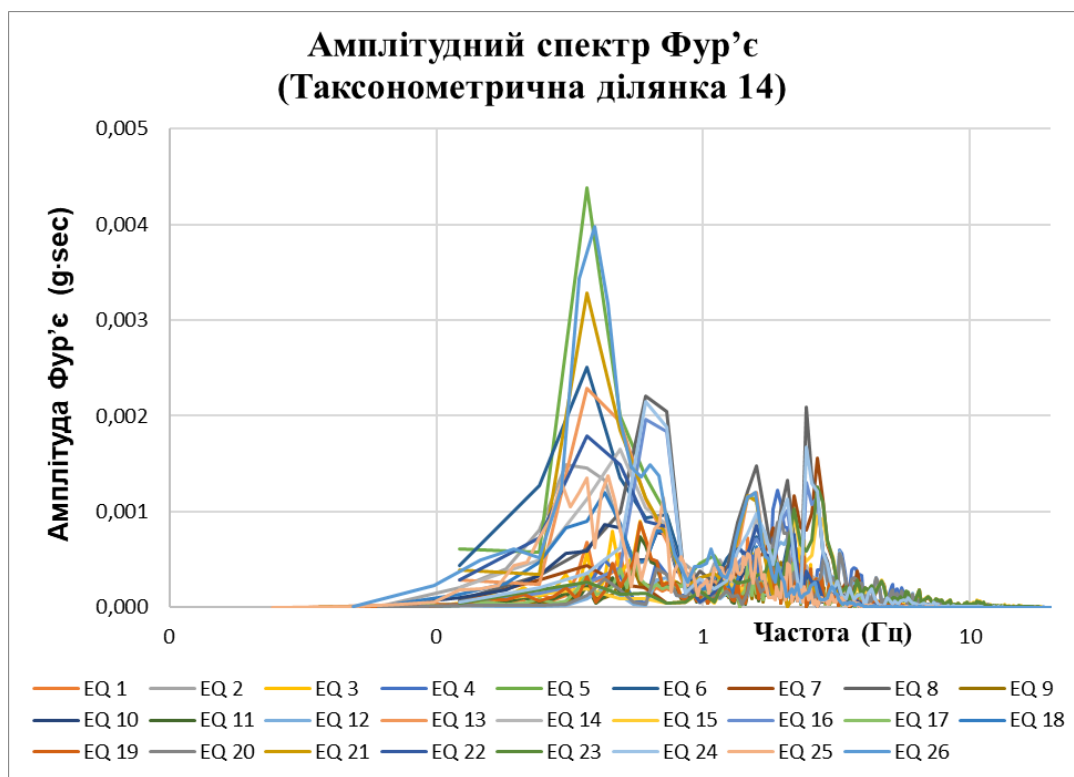


Рис. 5.72 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 14 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

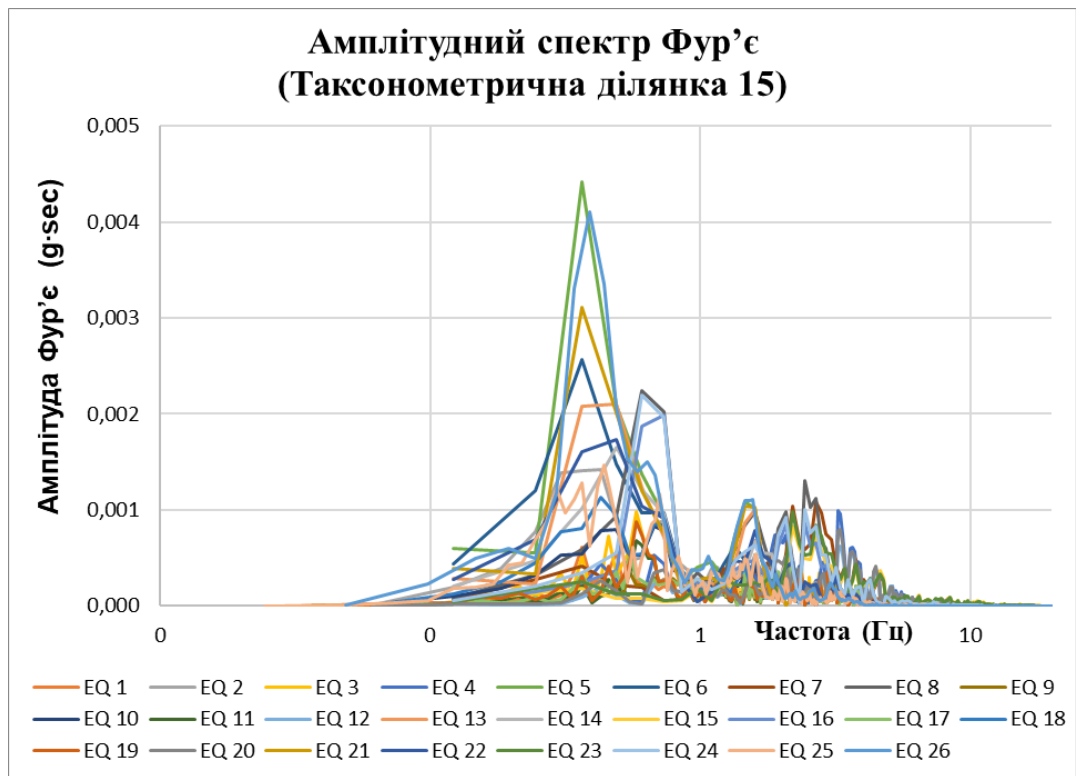


Рис. 5.73 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 15 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

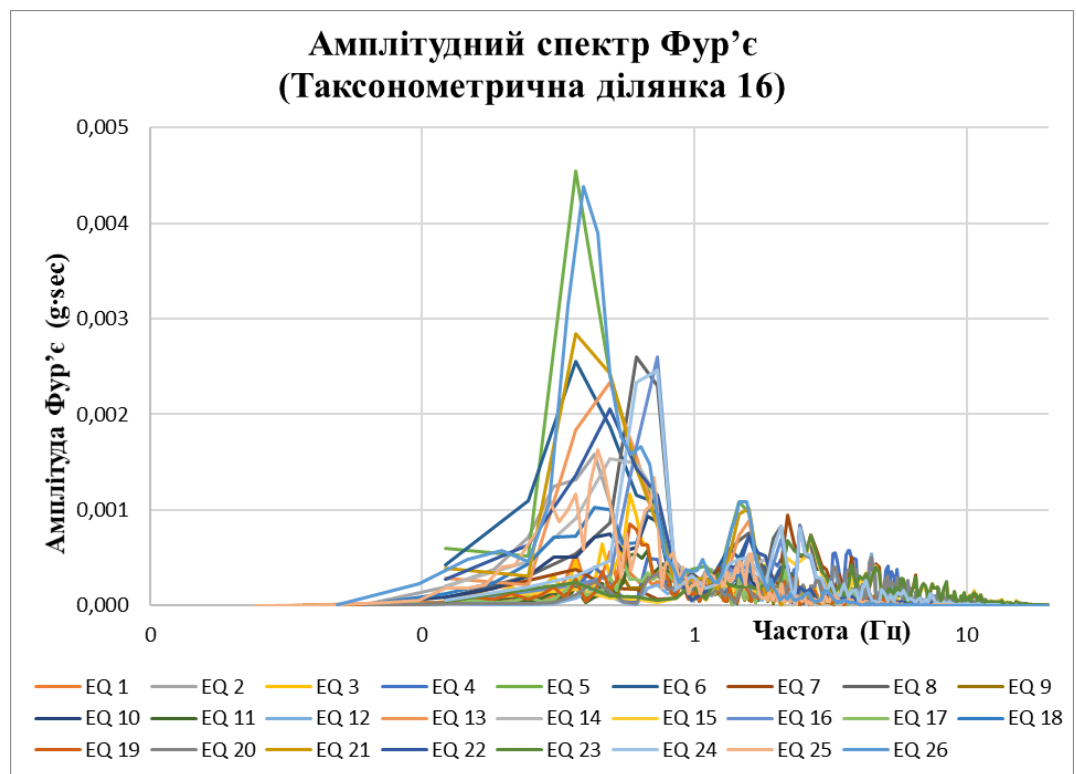


Рис. 5.74 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту таксонометричної ділянки № 14 як результат її зондування 26-ма сейсмічних впливів

Аналіз амплітудних спектрів Фур'є прискорень ґрунту таксонометричних ділянок №1- №16, показав, що найбільші значення спостерігаються в спектрах таксонометричних ділянок №13, №14, №15, №16 відповідно. Більша частина енергії сейсмічних коливань в амплітудних спектрах Фур'є прискорень ґрунту вказаних таксонометричних ділянок спостерігається в частотному діапазоні від 0,24 Гц до 0,85 Гц.

5.6. Спектри реакцій (відгуків) таксонометричних ділянок Києва

В багатьох літературних джерелах [Вознесенский, 1999; Kramer, 1996, Yoshida, 2014 та ін.], відмічається, що при інженерних розрахунках сейсмостійкості об'єктів необхідно враховувати вплив будови ґрунтової товщі на форму спектра реакції будівлі чи споруди.

Спектр реакції є діаграмою, яка відображає максимальну реакцію осциляторів з одним ступенем свободи, заданими власними частотами і власними згасаннями коливань на сейсмічні впливи. Змінюючи власну частоту (період) та власний коефіцієнт згасання системи (конструкції), можна оцінити максимальні величини реакції конкретних структур (конструкцій) із тотожними до одиничних осциляторів значеннями їх власних періодів (частот) та власного згасання. Спектри реакції розраховують для прискорення, швидкості або зміщення системи (конструкції). Вперше ідея використання спектрів максимальної реакції для представлення сейсмічних впливів була викладена в 1926 р. в роботі К.А. Сюехіро [Suyehiro, 1926]. На сьогоднішній день використання спектрів реакції є важливою і широко використовуваною технологією в теорії і практиці розрахунків будівель і споруд на сейсмостійкість, використання якої регламентується нормативними будівельними документами більшості країн.

На рис. 5.75 ÷ 5.90 представлено, отримані в результаті аналізу сейсмічної реакції і ділянок № 1 ÷ 16, спектри реакції одиничних осциляторів з 5% власним згасанням на 26 сейсмічних впливів (з різним спектральним складом та максимальною амплітудою від 0,01g до 0,06g). Спектр реакції є важливим

показником, яким задають прогнозовані параметри сейсмічної небезпеки, необхідні для розрахунків додаткових сейсмічних навантажень спектральним методом, відповідно до вимог будівельних нормативів [Будівництво..., 2014].

Для характеристики особливостей спектрів реакції кожної ділянки, в роботі використовуються наступні параметри: спектральне прискорення $S_A(T)$; діапазон резонансного підсилення спектрального прискорення (абсолютна ширина спектра $\Delta W_T = T_B - T_H$), що визначається граничними періодами мінімальним T_H та максимальним T_B , які відповідають точкам, в яких спектральне прискорення дорівнює 0,7 від максимального [Берзон и др., 1962]; площа підспектральної області S_{RS} , (розраховувалась методом чисельного інтегрування Сімпсона з кроком інтегрування 0,02 сек).

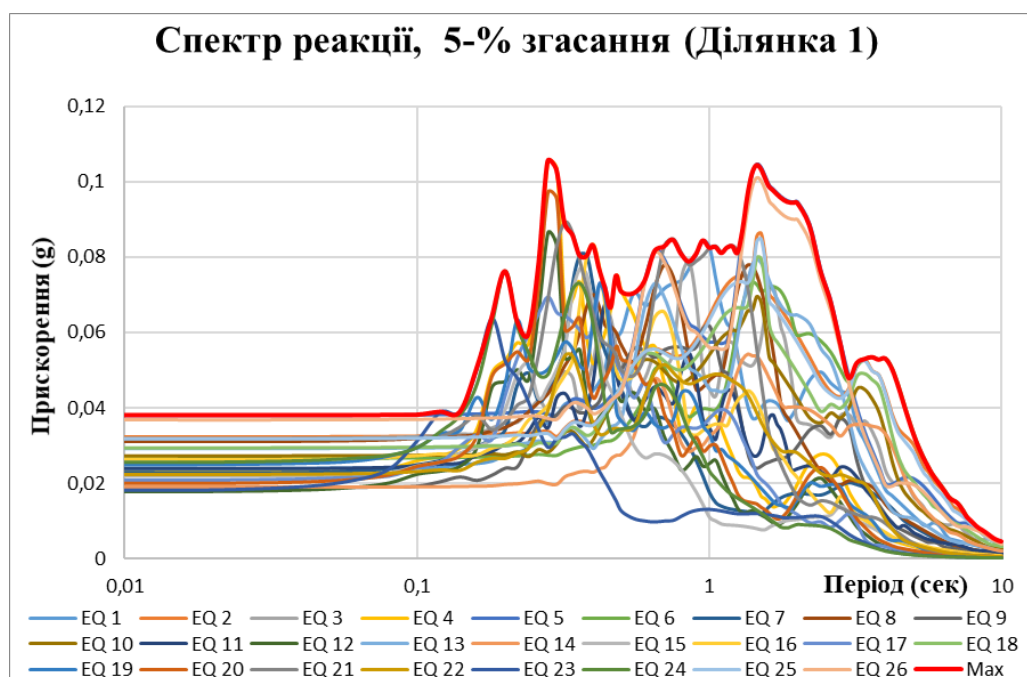


Рис. 5.75 Розраховані для таксонометричної ділянки № 1 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки №1 (див. Рис. 5.75) характеризується широким діапазоном періодів підсилення спектрального

прискорення ($W_T=2,4$ с) від 0,2 с до 2,6 с. У цьому діапазоні спостерігаються 2 максимуми з переважаючими періодами коливань 0,28 с і 1,5 с і спектральним прискоренням $S_A(T)$ біля 0,1g. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,110$.

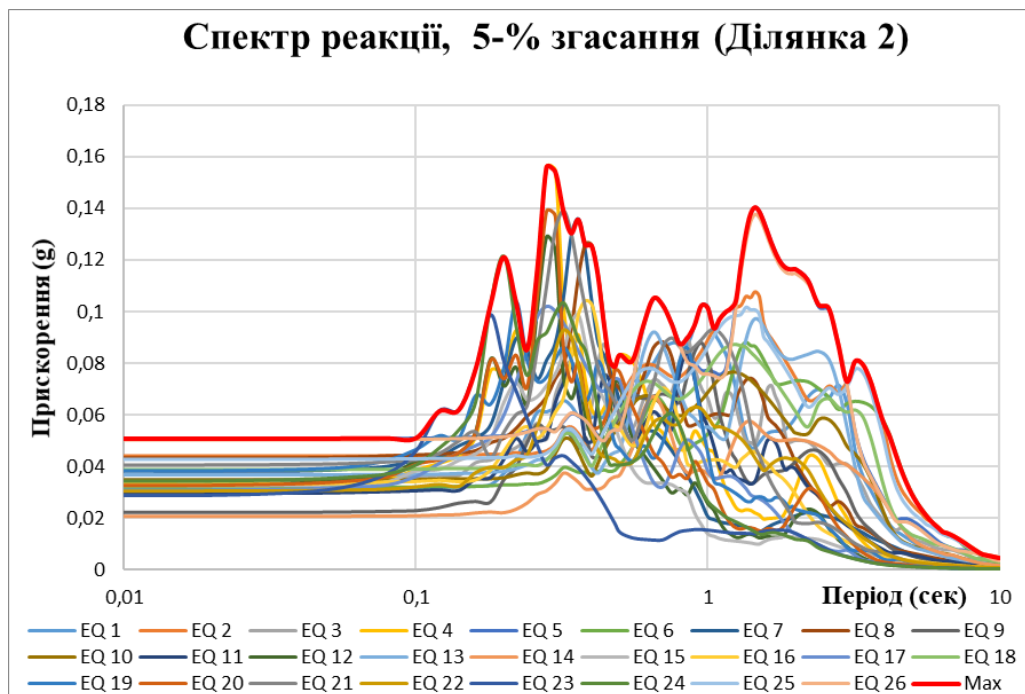


Рис. 5.76 Розраховані для таксонометричної ділянки № 2 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки №2 (див. рис. 5.76) характеризується досить широким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення ($W_T=2,42$ с) від 0,18 с до 2,6 с. У діапазоні періодів спостерігаються 2 максимуми з максимальними значеннями спектрального прискорення ($S_A(T)=0,155$ g з періодом коливань $T=0,28$ с і $S_A(T)=0,155$ g при $T=1,5$ с) і 3 максимуми з нижчими значеннями спектрального прискорення ($S_A(T)=0,121$ g при $T=0,2$ с, $S_A(T)=0,105$ g з періодом коливань $T=0,65$ с і $S_A(T)=0,1$ g, що відповідає $T=1$ с). Площа підспектральної області $S_{RS}=0,143$.

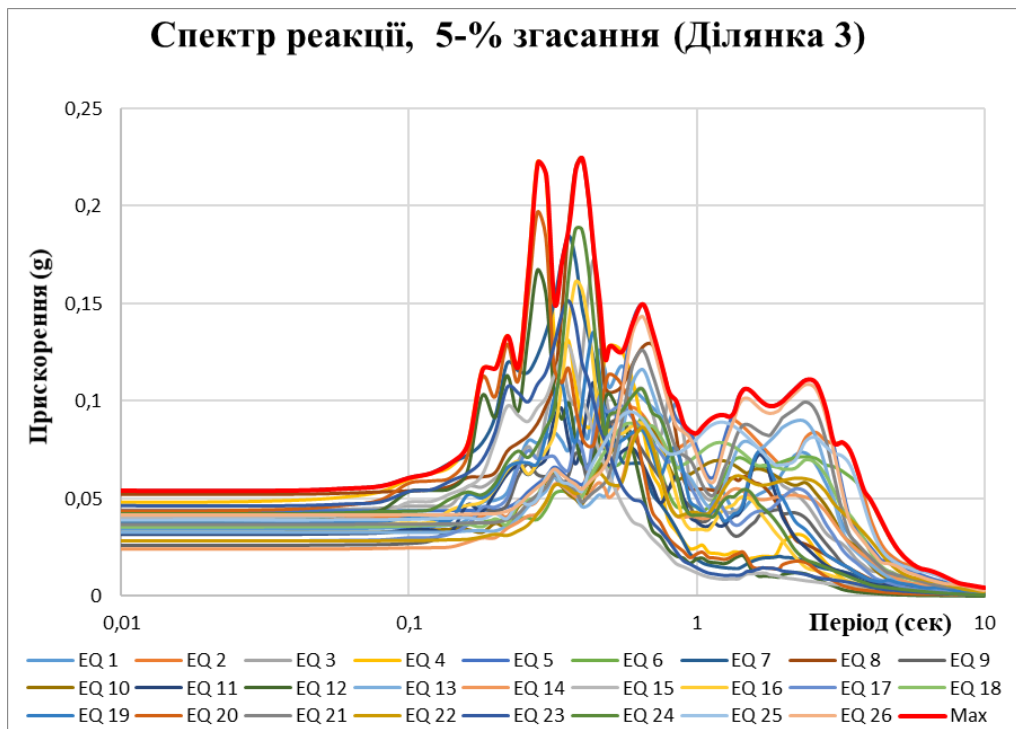


Рис. 5.77 Розраховані для таксонометричної ділянки № 3 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 3 (див. рис. 5.77) характеризується вузьким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення ($W_T=0,22$ с) від 0,24 с до 0,46 с. У діапазоні періодів спостерігаються 2 чітких максимуми з максимальними значеннями спектрального прискорення ($S_A(T)=0,222$ g з періодом коливачь $T=0,28$ с і $S_A(T)=0,224$ g при $T=0,4$ с) і 4 піки за межами резонансного періодного діапазону, виділеного граничними періодами, які відповідають точкам 0,7 від максимального спектрального прискорення. 1 пік відповідає періоду коливачь 0,2 с з $S_A(T)=0,121$ g, 2 пік з $T=0,65$ с та $S_A(T)=0,149$ g, 3 пік характеризується $T=1,5$ с з $S_A(T)=0,106$ g, 4 пік відповідає періоду $T=2,6$ с та $S_A(T)=0,109$ g). Площа підспектральної області $S_{RS}=0,154$.

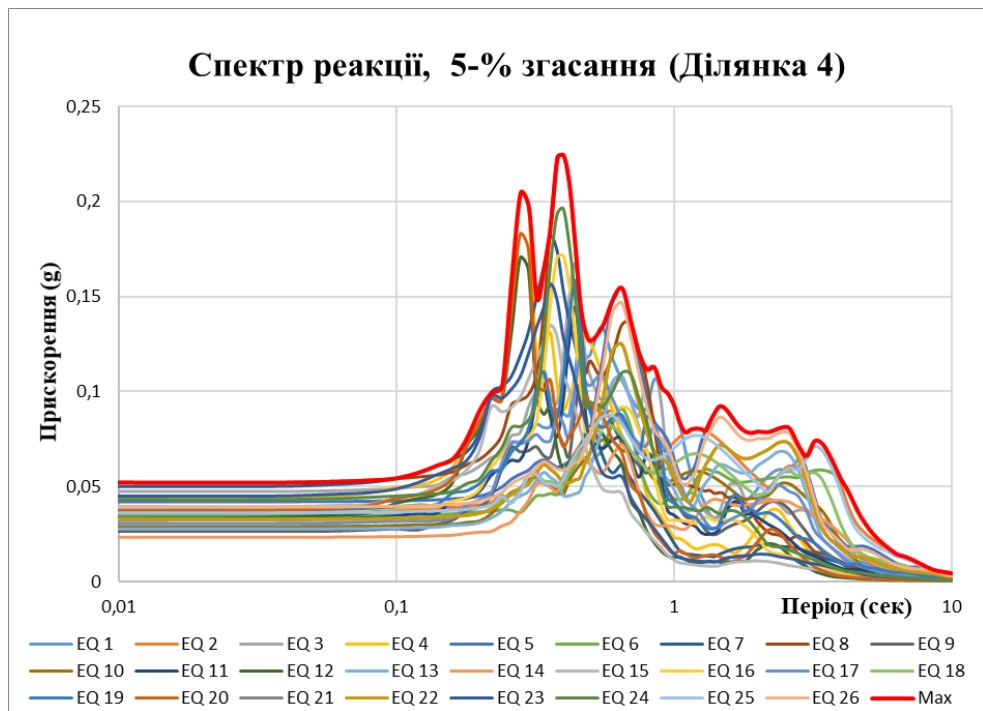


Рис. 5.78 Розраховані для таксонометричної ділянки № 4 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 4 (див. рис. 5.78) характеризується вузьким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення ($W_T=0,19$ с) від 0,26 с до 0,45 с. В резонансному діапазоні періодів спостерігаються 2 чітких максимуми з максимальними значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,204$ g з періодом коливань $T=0,28$ с і $S_A(T)=0,224$ g при $T=0,4$ с). За межами резонансного діапазону можна відмітити ще 2 піки. Перший пік відповідає періоду коливань $T=0,65$ с і $S_A(T)=0,154$ g. Другий пік відповідає $T=1,5$ с і $S_A(T)=0,09$ g. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,145$.

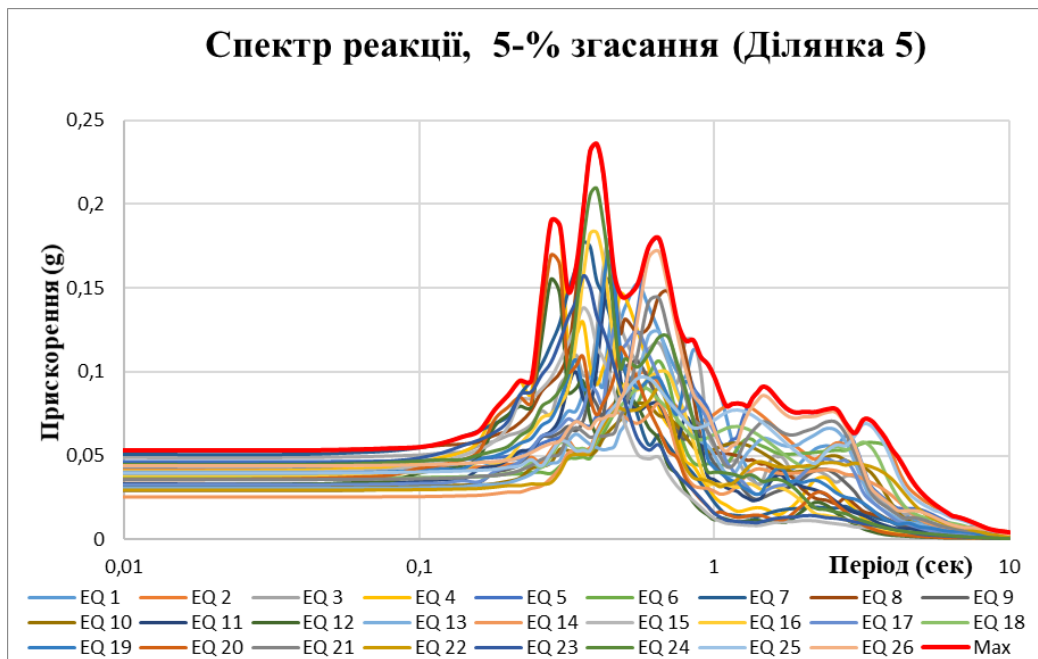


Рис. 5.79 Розраховані для таксонометричної ділянки № 5 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 5 (рис. 5.79) характеризується діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення $W_T=0,42$ с від 0,28 с до 0,7 с. У вказаному резонансному діапазоні періодів спостерігаються 3 чітких максимуми з максимальними значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,189$ g на $T=0,28$ с, $S_A(T)=0,235$ g на $T=0,4$ с і $S_A(T)=0,179$ g на $T=0,65$ с . За межами резонансного діапазону можна відмітити ще 1 незначний пік на періоді $T=1,5$ с з $S_A(T)=0,109$ g. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,147$.

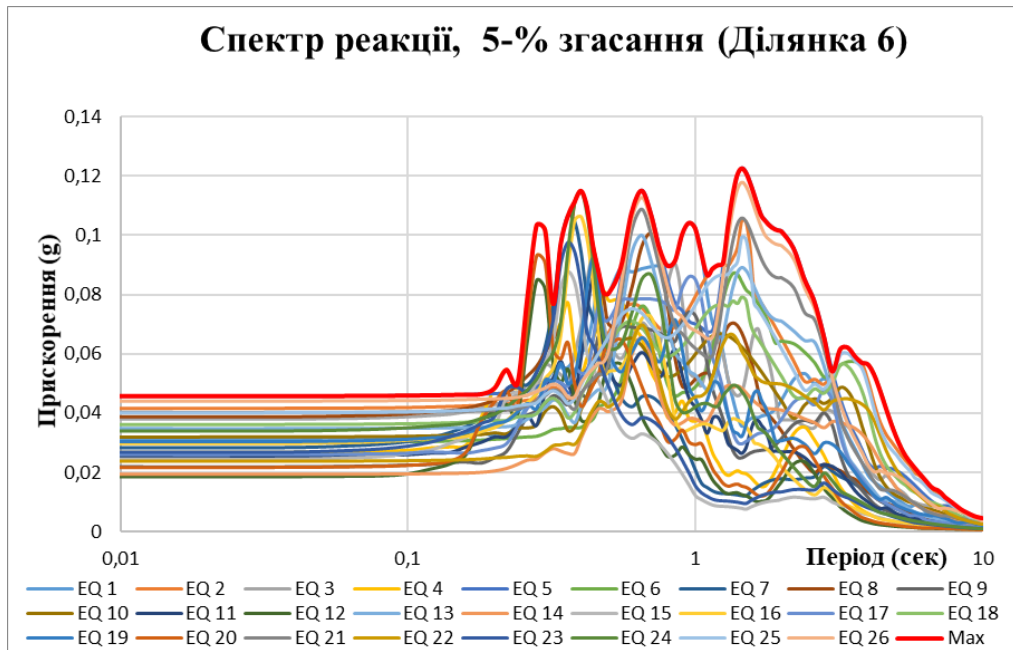


Рис. 5.80 Розраховані для таксонометричної ділянки № 6 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 6 (див. рис. 5.80) характеризується широким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення ($W_T=2,14$ с) від 0,26 с до 2,4 с. У вказаному резонансному діапазоні періодів спостерігаються 5 максимумів з максимальними значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,1803$ g на $T=0,28$ с, $S_A(T)=0,115$ g на $T=0,4$ с, $S_A(T)=0,115$ g на $T=0,65$ с, $S_A(T)=0,1$ g на $T=1$ с і $S_A(T)=0,121$ g на $T=1,5$ с. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,123$.

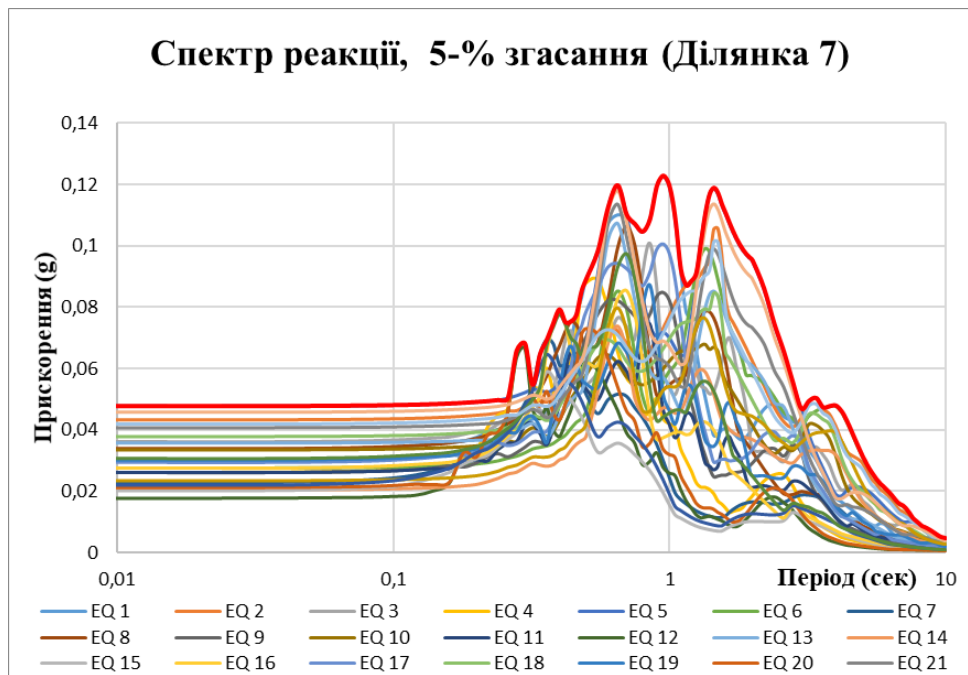


Рис. 5.81 Розраховані для таксонометричної ділянки № 7 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 7 (див. рис. 5.81) характеризується широким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення $W_T=1,82$ с від 0,48 с до 2,3 с. У вказаному резонансному діапазоні періодів спостерігаються 3 чітких максимуми з максимальними значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,119$ g на $T=0,65$ с, $S_A(T)=0,122$ g на $T=0,95$ с, $S_A(T)=0,117$ g на $T=1,5$ с. За межами резонансного діапазону можна відмітити ще 2 піки з амплітудою значно меншою ніж 0,7 від максимальної. Вказані піки знаходяться на періодах 0,3 с і 0,4 с і з спектральним прискоренням 0,068 g і 0,079 g відповідно. Площа підспектральної області складає $S_{RS}=0,117$.

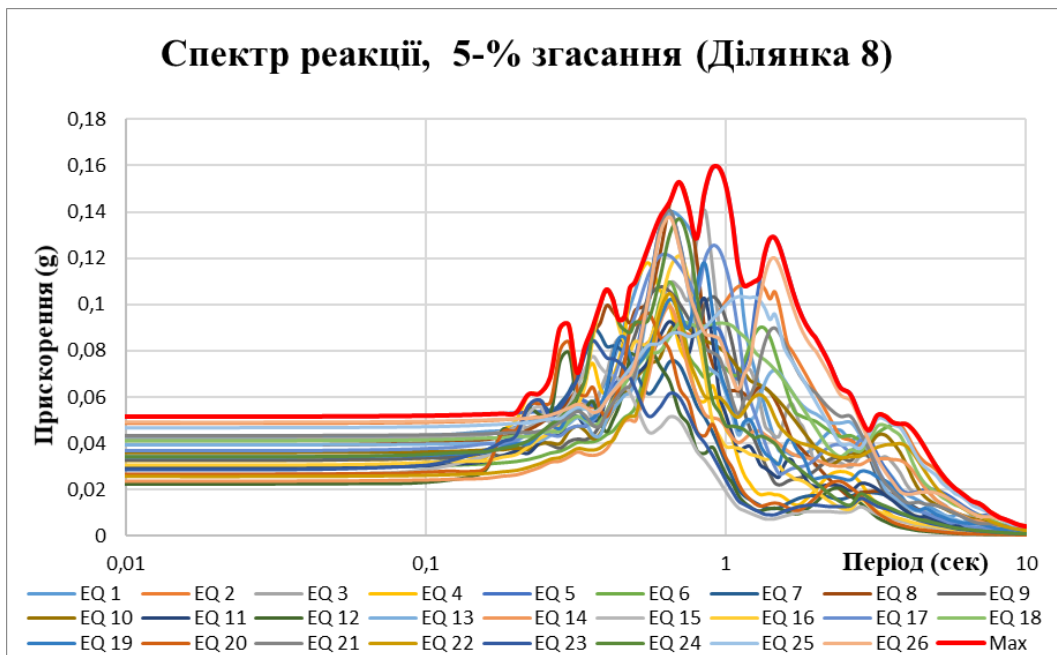


Рис. 5.82 Розраховані для ділянки № 8 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

З рис. 5.82 видно, що спектр реакції таксонометричної ділянки № 8 характеризується вузьким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення, а саме $W_T=1,1$ с від 0,5 с до 1,6 с. У вказаному резонансному діапазону періодів постерігаються 3 чітких максимуми з максимальними значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,152$ g на $T=0,7$ с, $S_A(T)=0,159$ g на $T=0,9$ с, $S_A(T)=0,126$ g на $T=1,5$ с. За межами резонансного діапазону можна відмітити ще 2 піки з амплітудою значно меншою ніж 0,7 від максимальної. Вказані піки знаходиться на періодах 0,3 с і 0,4 с і з спектральним прискоренням 0,091 g і 0,106 g відповідно. Площа підспектральної області складає $S_{RS}=0,132$.

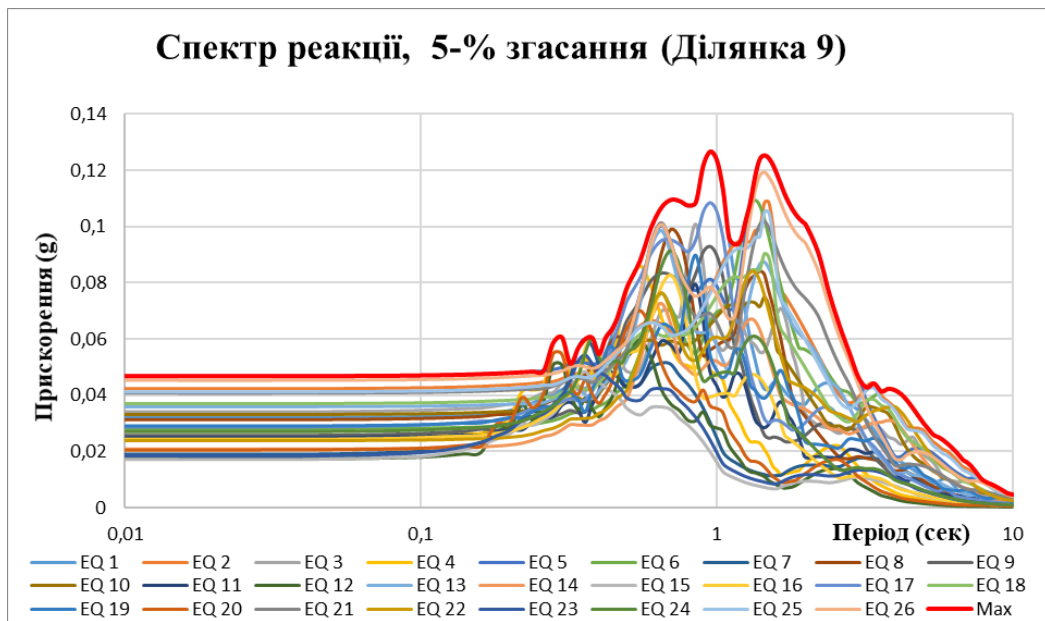


Рис. 5.83 Розраховані для таксонометричної ділянки № 9 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 9 (рис. 5.83) характеризується досить широким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення, а саме $W_T=1,65$ с від 0,55 с до 2,2 с. У вказаному резонансному діапазону періодів спостерігаються 3 максимуми підсилення спектрального прискорення. Вказані максимуми знаходиться на періодах 0,7 с, 0,95 с і 1,5 с з спектральним прискоренням 0,109 g, 0,126 g і 0,124 g відповідно. За межами вказаного вище резонансного діапазону можна відмітити ще 1 незначний пік на періоді $T=0,3$ с з $S_A(T)=0,06$ g. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,116$.

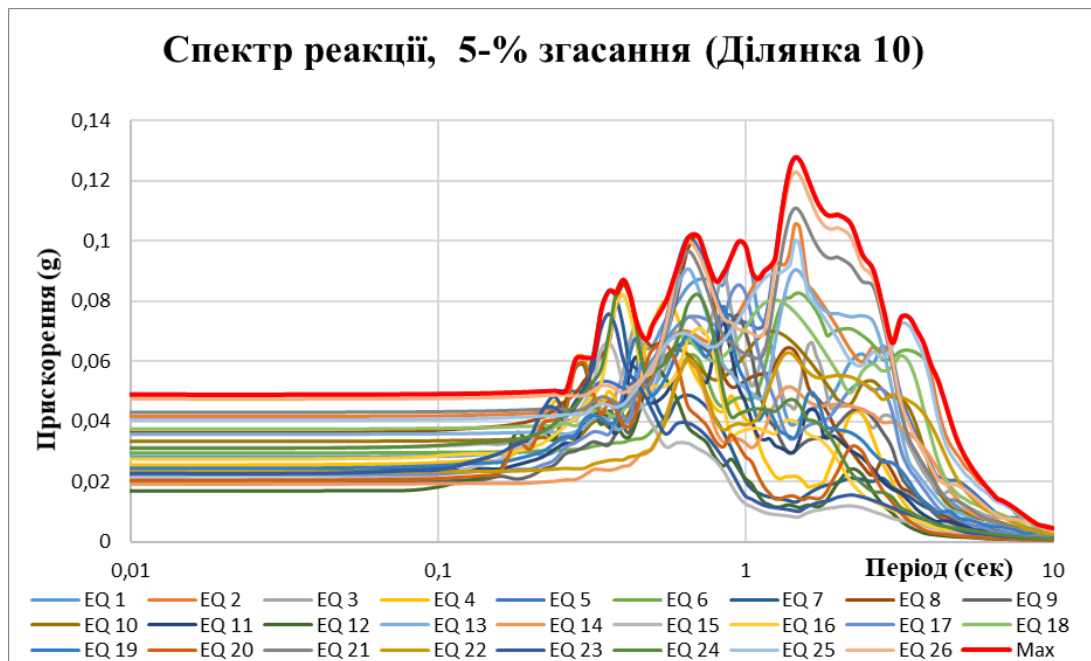


Рис. 5.84 Розраховані для таксонометричної ділянки № 10 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 10 (рис. 5.84) характеризується широким діапазоном періодів $W_T=2,42$ с (від 0,38 с до 2,8 с) підсилення спектрального прискорення. У вказаному діапазоні періодів знаходяться 4 максимуми. Вказані максимуми знаходиться на періодах 0,4 с, 0,65 с, 1 с і 1,5 с з спектральним прискоренням 0,087 g, 0,101 g, 0,098 g і 0,128 g відповідно. За межами вказаного вище резонансного діапазону відмічається ще 2 незначних піки на періодах $T=0,3$ с і $T=3,2$ с з $S_A(T)=0,061$ g і $S_A(T)=0,075$ g відповідно. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,120$.

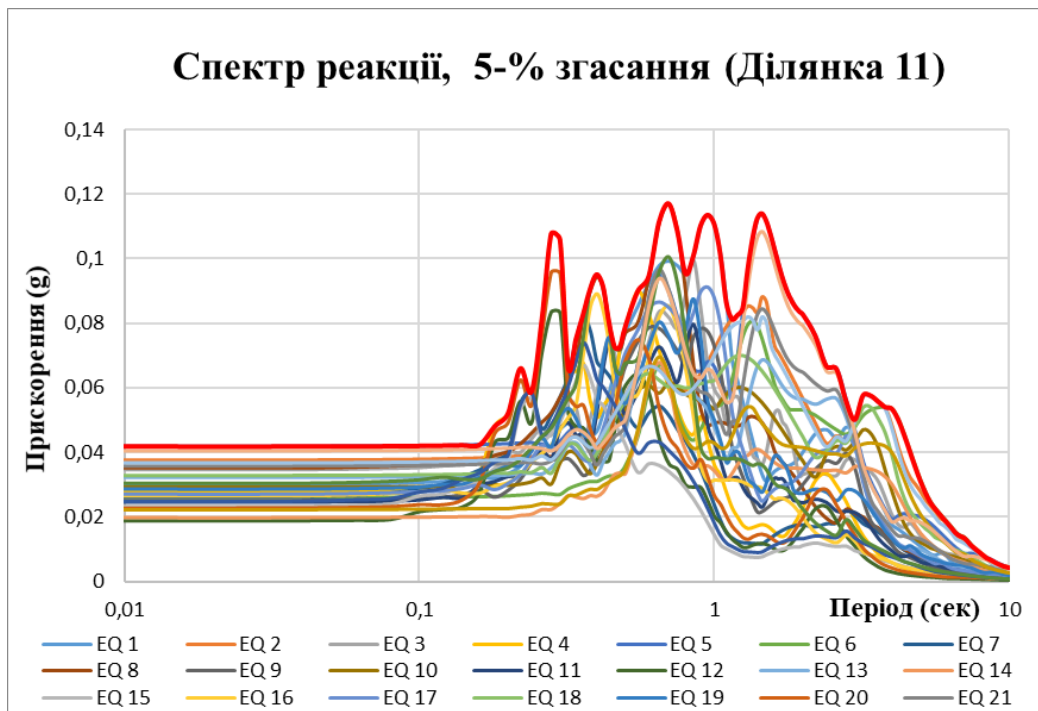


Рис. 5.85 Розраховані для таксонометричної ділянки № 11 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 11, представлений на рис.5.85 характеризується резонансним діапазоном періодів $W_T=1,74$ с від 0,26 с до 2,0 с. В ньому спостерігаються 5 чітких максимумів з значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,107$ g на $T=0,28$ с, $S_A(T)=0,095$ g на $T=0,4$ с, $S_A(T)=0,117$ g на $T=0,7$ с, $S_A(T)=0,113$ g на $T=0,095$ с і $S_A(T)=0,112$ g на $T=1,5$ с. Площа підспектральної області складає $S_{RS}=0,115$.

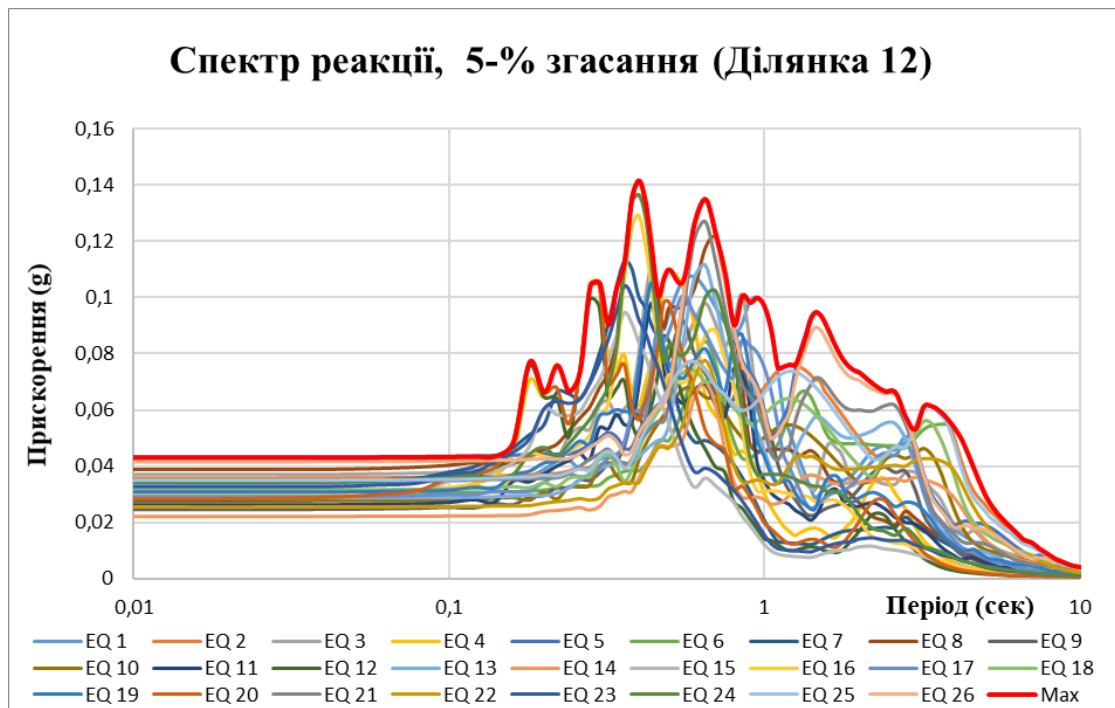


Рис. 5.86 Розраховані для таксонометричної ділянки № 12 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 12 (див. рис. 5.86) характеризується вузьким резонансним діапазоном підсилення спектрального прискорення $W_T=0,72$ с від 0,28 с до 1 с. В вказаному діапазоні періодів знаходяться 4 максимуми. Вказані максимуми знаходиться на періодах 0,3 с, 0,4 с, 0,65 с і 0,95 с з спектральним прискоренням 0,105 g, 0,141 g, 0,135 g і 0,1 g відповідно. За межами резонансного діапазону можна відмітити ще 2 піки з амплітудою меншою ніж 0,7 від максимальної, тому вони не увійшли в опис резонансного діапазону. Вказані піки знаходиться на періодах 0,18-0,22 с і 1,5 с з спектральним прискоренням 0,076-0,077 g і 0,094 g відповідно. Площа підспектральної області складає $S_{RS}=0,119$.

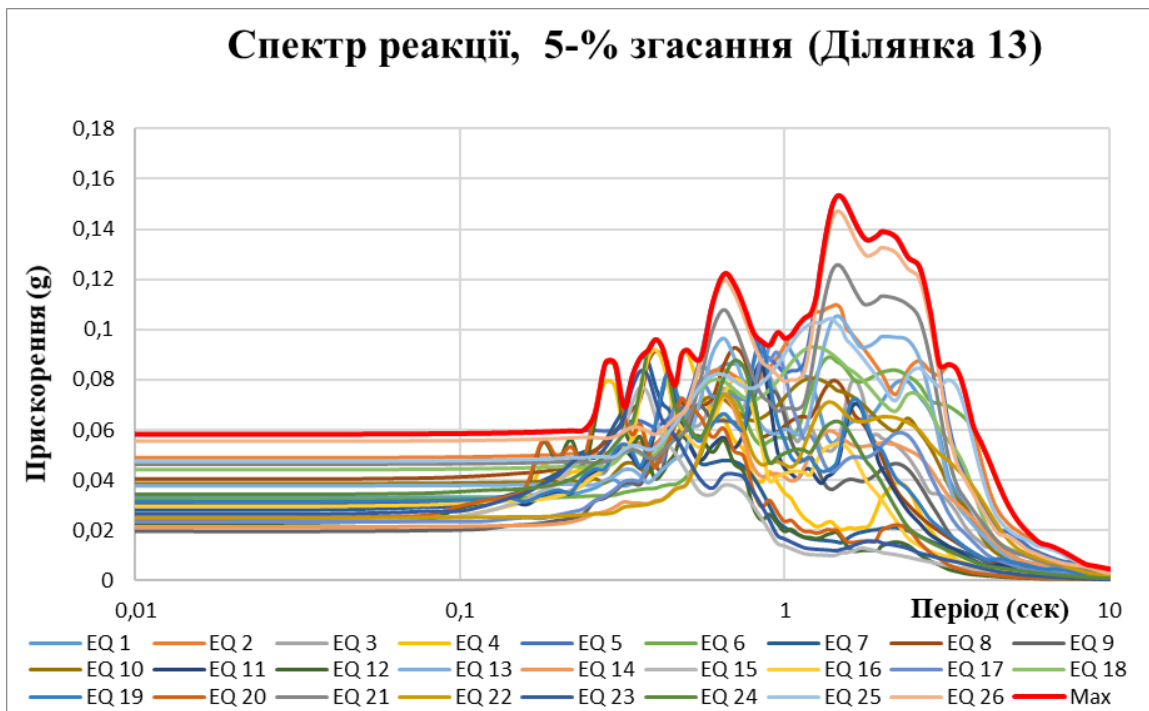


Рис. 5.87 Розраховані для таксонометричної ділянки № 13 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки №13 (див. рис. 5.87) характеризується широким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення $W_T=2,2$ с від 0,6 с до 2,8 с. У вказаному діапазоні періодів знаходяться 2 максимуми. Вказані максимуми знаходиться на періодах 0,65 с і 1,45 – 2,2 с з спектральним прискоренням 0,122 g і 0,153-0,136 g відповідно. За межами вказаного вище резонансного діапазону відмічається ще декілька незначних піків з амплітудою значно меншою ніж 0,7 від максимальної на періодах 0,3 с, 0,4 с і 0,5 с з $S_A(T)=0,086$ g, $S_A(T)=0,096$ g і $S_A(T)=0,092$ g відповідно. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,140$.

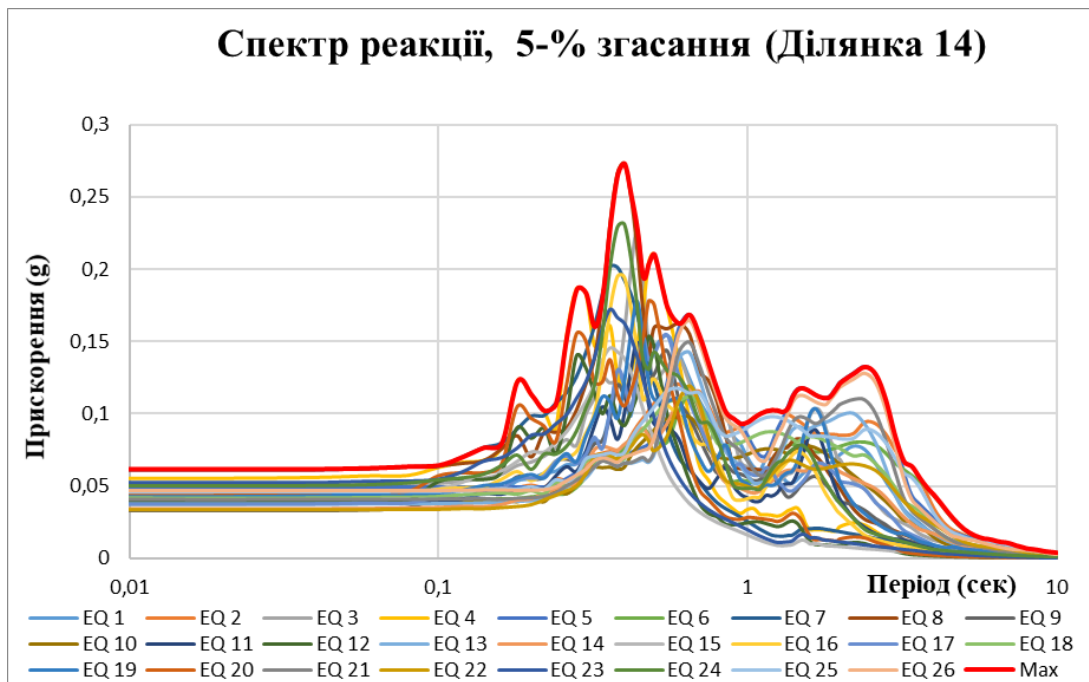


Рис. 5.88 Розраховані для таксонометричної ділянки № 14 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки №14, представлений на рис. 5.88 характеризується вузьким резонансним діапазоном періодів $W_T=0,17$ с від 0,35 с до 0,52 с. В вказаному діапазоні періодів спостерігаються 1 чіткий максимум з значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,273$ g на $T=0,4$ с з незначним додатковим піком на $T=0,5$ і $S_A(T)=0,209$ g. За межами вказаного вище резонансного діапазону відмічається ще декілька піків з амплітудою значно меншою ніж 0,7 від максимальної, тому вони не ввійшли в опис резонансного діапазону, на періодах 0,18 с, 0,28 с, 0,65 с, 1,45 с і 2,4 с з $S_A(T)=0,122$ g, $S_A(T)=0,186$ g, $S_A(T)=0,168$ g, $S_A(T)=0,116$ g і $S_A(T)=0,132$ g відповідно. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,170$

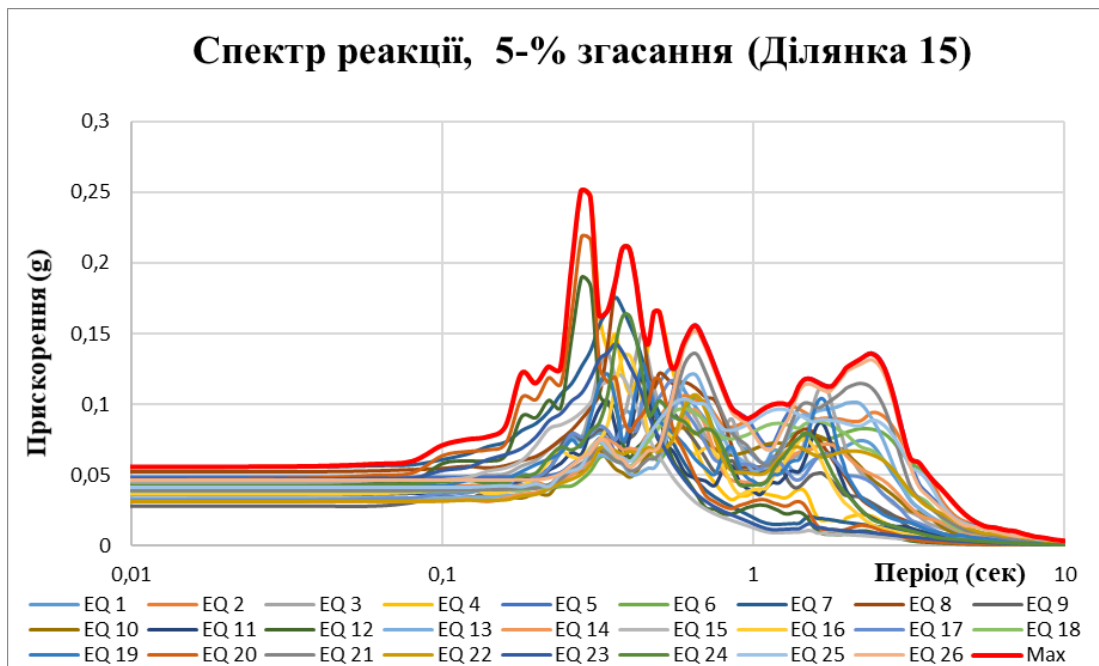


Рис. 5.89 Розраховані для таксонометричної ділянки № 15 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26-ть сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки № 15, представлений на рис. 5.89 характеризується вузьким резонансним діапазоном періодів $W_T=0,17$ с від 0,26 с до 0,43. В вказаному діапазоні періодів с спостерігаються 2 чітких максимуми з значеннями спектрального прискорення $S_A(T)=0,25$ g на $T=0,28$ с і $S_A(T)=0,21$ g на $T=0,4$ с. За межами вказаного вище резонансного діапазону відмічається ще декілька піків з амплітудою меншою ніж 0,7 від максимальної, тому вони не ввійшли в опис резонансного діапазону, на періодах 0,5 с, 0,65 с, 1,45 с і 2,4 с з $S_A(T)=0,165$ g, $S_A(T)=0,155$ g, $S_A(T)=0,168$ g, $S_A(T)=0,117$ g і $S_A(T)=0,136$ g відповідно. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,162$.

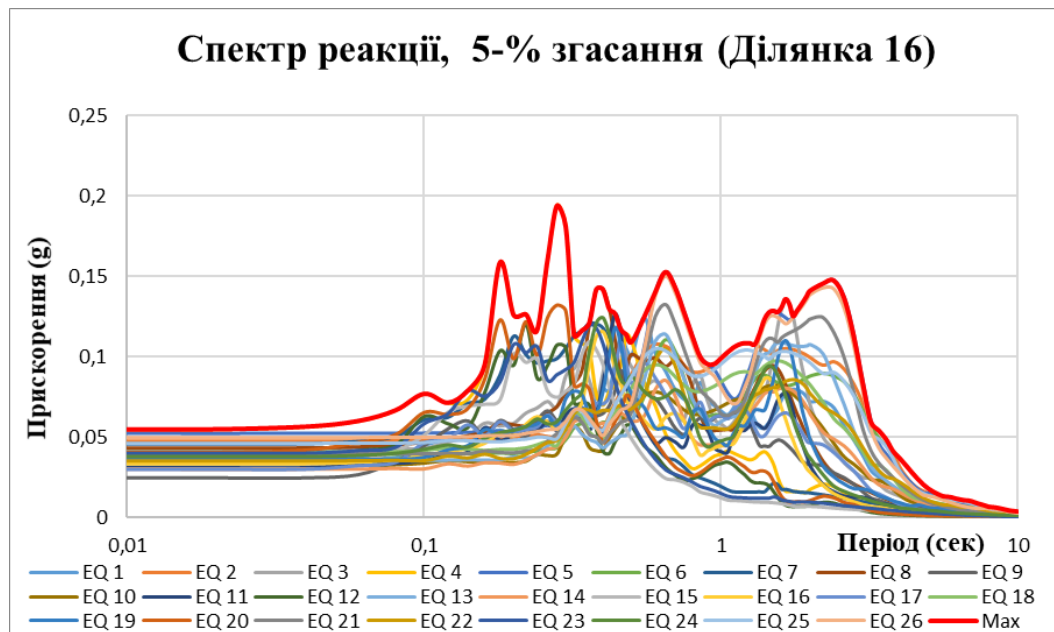


Рис. 5.90 Розраховані для таксонометричної ділянки № 16 спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Спектр реакції таксонометричної ділянки №16 (див. рис. 5.90) характеризується широким діапазоном періодів підсилення спектрального прискорення $W_T=2,42$ с від 0,18 с до 2,6. У вказаному діапазоні періодів знаходяться максимуми з спектральним прискоренням 0,159 g, 0,194 g, 0,142 g, 0,153 g , 0,136 g і 0,1347 g на періодах 0,18 с, 0,28 с, 0,4 с, 0,65 с, 0,165 с і 2,4 с відповідно. Площа підспектральної області $S_{RS}=0,155$.

В додатку 1 наводяться параметри розрахункових спектрів реакції з 5-% згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами для 16 таксонометричних ділянок території Києва.

На рис. 5.91 представлено розраховані спектри реакції для 16 таксонометричних ділянок. Оцінити, яка з ділянок характеризується «гіршими» умовами з сейсмічної точки зору, можна лише для конкретного об'єкту. Проте, враховуючи більш широкий частотний діапазон таксонометричних ділянок № 1, 2, № 6-11, №13, №16 можна стверджувати що на цих ділянках, при розрахунках сейсмостійкості, виявиться більше сейсмічно вразливих об'єктів і

конструкцій. Проте, спектральні прискорення вищі на ділянках № 3-5, № 14-15 з вузьким діапазоном спектрального підсилення, тому для об'єктів з близькими власними переважаючими періодами і згасаннями ці ділянки можуть виявитися дещо небезпечнішими.

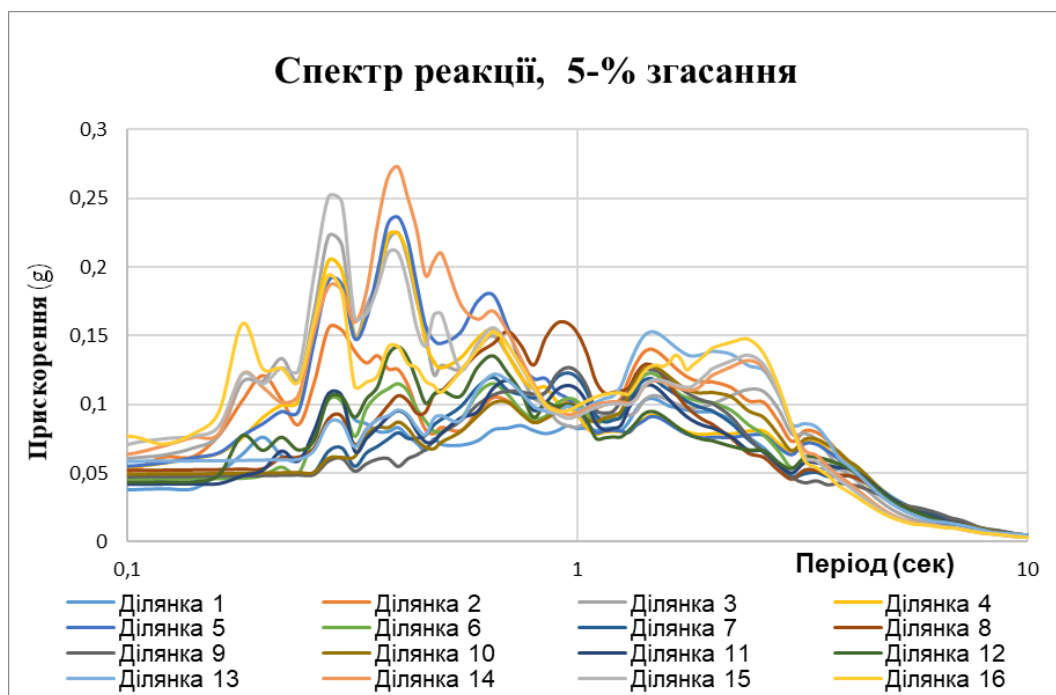


Рис. 5.91 Розраховані для ділянок № 1 -16 спектри реакції системи осциляторів з 5-% згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами

Аналізуючи рис. 5.91, де наведено всі спектри реакції, видно що розходження більше спостерігається по амплітуді, порівняно з шириною спектра.

Коефіцієнт кореляції між піковими значеннями спектрального прискорення $S_A(T)$ і площею підспектральної області S_{RS} складає 0,935893, що вказує на сильну пряму кореляцію. На рис. 5.92 графічно представлено кореляційний зв'язок між значеннями спектрального прискорення $S_A(T)$ і площею підспектральної області S_{RS} спектрів реакції з 5-% згасанням від критичного таксонометричних ділянок території Києва.

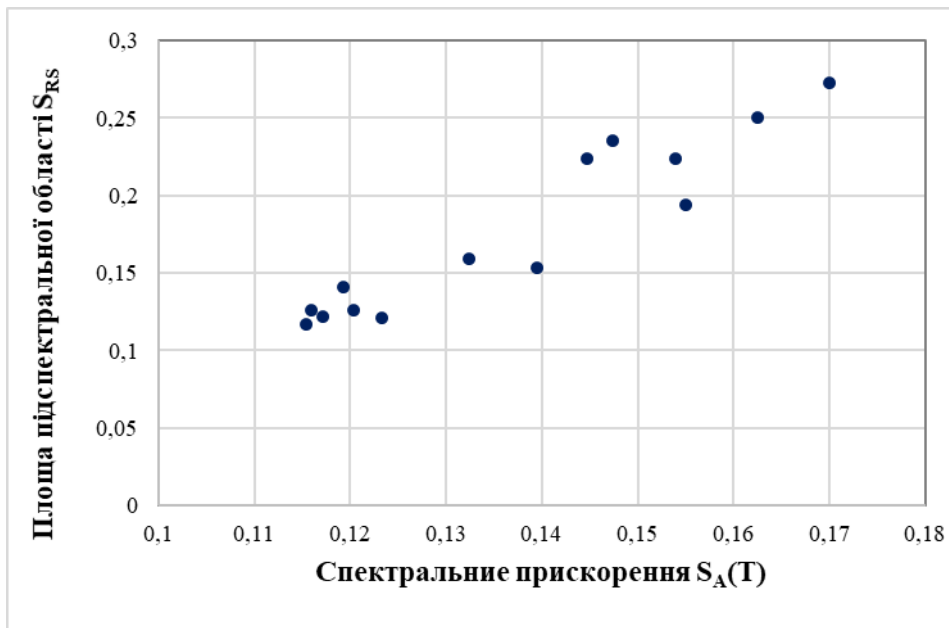


Рис. 5.92 Кореляційний зв'язок між значеннями спектрального прискорення $S_A(T)$ і площею підспектральної області S_{RS} спектрів реакції з 5-% згасанням від критичного таксонометричних ділянок території Києва

Кореляційний зв'язок між абсолютною шириною спектра (розрахованою для 0,7 від максимального значення спектрального прискорення) і площею підспектральної області S_{RS} спектрів реакції складає -0,55, що вказує на зворотну слабку кореляцію.

Таким чином, порівнюючи параметри сейсмічної реакції таксонометричних ділянок Києва, виділити за сейсмічними показниками, виходячи з результатів кореляційного аналізу, можна за значеннями спектрального прискорення. Найбільшими значеннями спектрального прискорення характеризуються таксонометричні ділянки №3 ($PS_A(T)=0,224g$), №4 ($PS_A(T)=0,224g$), №5 ($PS_A(T)=0,235g$), №14 ($PS_A(T)=0,273g$), №15 ($PS_A(T)=0,25g$), №16 ($PS_A(T)=0,194g$).

Висновки до Розділу 5

В розділі обґрунтовано необхідність удосконалення методики сейсмічного районування (зонування) в фізичних параметрах коливань ґрунту

та запропоновано аналітично-емпіричний підхід, який реалізовано на прикладі території Києва. В межах території Києва методом сейсмо-геологічних аналогій виділено таксонометричні ділянки (зони), на яких сейсмічний ефект може суттєво відрізнятись. Для кожної таксонометричної ділянки побудовано розрахункову сейсмогеологічну модель з параметрами непружного деформування, які дозволяють врахувати виникнення нелінійних ефектів при сейсмічних навантаженнях. Розраховано усереднену амплітудно-частотну характеристику для ґрунтових умов території Києва з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів. Побудовано карту розподілу коефіцієнта інтегрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва. Під інтегральним спектральним підсиленням приймається площа підспектральної функції. Коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань пропонується використовувати в якості поправочних коефіцієнтів в методах розрахунку будівель на сейсмостійкість. Розраховані поправочні ґрунтові коефіцієнти враховують зміну сейсмічної жорсткості ґрунтів між шарами в межах ґрунтової товщі та нелінійні властивості ґрунтів. В цьому є перевага застосування отриманих в роботі поправочних коефіцієнтів порівняно з тими, що пропонуються в чинних держаних будівельних нормах.

Проведено динамічний аналіз поширення сейсмічних коливань в сейсмогеологічних моделях та виділено сейсмічно слабкі шари в ґрунтових розрізах території Києва. Виділені ґрунти при певному розташуванні по глибині і певній потужності проявляються, як сейсмічно слабкі прошарки з високими значеннями пікової зсувної деформації. В розрізах фрагменту Київ М-36-ХІІІ геологічної карти ДНВП "Геоінформ України" до таких ґрунтів віднесено моренні відклади з включеннями супісків в при поверхневому заляганні і потужністю від 10 м. Найбільше значення пікової зсувної деформації 0,173 % може спостерігатись при сейсмічних впливах з максимальною амплітудою 0,06g в розрізі моделі таксонометричної ділянки 2. Також в якості сейсмічно слабкого шару проявились прошарки складені піском алювіальним при потужності від 30 м. При менших значеннях потужності

спостерігались високі значення максимального коефіцієнта поглинання, проте без високих значень деформації зсуву.

Проілюстровано вплив верхнього осадового шару на значення пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні. Побудовано карту розподілу PGA на території Києва при сейсмічних впливах з максимальною амплітудою 0,06g.

Для кожної таксонометричної ділянки розраховано амплітудні спектри Фурє та спектри реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами. В результаті кількісної інтерпретації та аналізу розрахованих спектрів реакції встановлено сильну пряму кореляцію між піковими значеннями спектрального прискорення і площею підспектральної області і слабку зворотну між абсолютною шириною спектра і площею підспектральної області. Отриманий результат вказує на те, що порівнюючи сейсмічні показники таксонометричних ділянок території Києва в загальному випадку, більш інформативними є амплітудні параметри ніж ширина спектра. Проте, оцінити, яка з ділянок характеризується «гіршими» умовами з сейсмічної точки зору, можна лише для конкретного об'єкту. Враховуючи більш широкий частотний діапазон таксонометричних ділянок № 1, 2, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 16 можна стверджувати що на цих ділянках, при розрахунках сейсмостійкості, виявиться більше сейсмічно вразливих об'єктів і конструкцій. Проте, спектральні прискорення вищі на ділянках № 3-5, № 14-15 з вузьким діапазоном спектрального підсилення, тому для об'єктів з близькими власними переважаючими періодами і згасаннями ці ділянки можуть виявитися більш небезпечними для конкретних об'єктів, порівняно з ділянками, що характеризуються широким резонансним діапазоном і меншими значеннями спектрального прискорення. Виділено таксонометричні ділянки, що характеризуються найбільшими значеннями спектрального прискорення.

В розділі показано, що для оцінки потенціалу небезпеки від сейсмічних коливань ґрунту при землетрусах недостатньо одного параметра. Амплітудні характеристики сейсмічних коливань ґрунту слід розглядати комплексно з врахуванням частотного складу. Отримані результати можна використовувати

при вирішенні як практичних так і методологічних задач сейсмостійкого проєктування та будівництва.

Перелік використаних джерел до Розділу 5

1. Angel, Javier (2020). "ArcMap Continued Support". Esri. Retrieved 2020-12-09.
2. EPRI, Electrical Power Research Institute (1993). Guidelines for determining design basis ground motions. Volume 1: Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America, Rpt. No. EPRI TR-102293, Palo Alto, CA.
3. Eurocode 8 (1998). Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings - National annex. - NBN EN 1998-1 ANB:2011, 2011.
4. Goodman R.E. (1980). Introduction to Rock Mechanics: Wiley, New York.
5. Idriss I. M. (1999). An Update to the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential: Proc. of TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction, Federal Highway Administration, Washington DC, 10 January 1999.
6. Kendzera O., Semenova Y. (2020). Seismic zoning of Kyiv in physical parameters of soil oscillations. *Geodynamics*, 2 (29), 97-106 <https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.097>.
7. Kramer S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
8. Lama R. D., Vutukuri V. S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks-Testing Techniques and Results*: Trans Tech Publications
9. Leynaud, D., Jongmans, D., Teerlynck, H., and Camelbeeck, T. (2000). Seismic hazard assessment in Belgium. *Geologica Belgica*, 3 (1 – 2): 67 – 86.
10. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. (1998). User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 54 p. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972). SHAKE – A Computer Program for Earthquake

Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report EERC-72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, CA

11. Semenova Yu. (2019). Comparison of the simulated peak ground acceleration at different sites located close to each other. // International Research Journal, 7 (85), 44-46 <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.85.7.008>.

12. Semenova Yu. (2021a). Modeling the influence of local soil conditions on the earthquake motion in the territory of Kyiv // Colloquium-journal, 3(90), 16-18 DOI: 10.24412/2520-2480-2021-390-16-18.

13. Suyehiro K. A. (1926). Seismic Vibration Analyser and the Records Obtained Therewit // Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo. – 1926. – №1. – P. 59–64.

14. Yoshida N. (2015). Seismic Ground Response Analysis; Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Series, Volume 36, Springer: Dordrecht, The Netherlands. 365. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.

15. Амосов А. А. (1994). Вычислительные методы для инженеров: учебное пособие для вузов / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н.В. Копченова. - Москва: Высшая школа, 544 с.

16. Аптикаев Ф.Ф. (2012). Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 176 с.

17. Берзон И. С., Епинаньева А. М., Парийская Г. Н., Стародубовская С. П. (1962). Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Москва: Изд-во АН СССР, 507 с.

18. Будівництво в сейсмічних районах України ДБН В.1.1-12:2014. (2014). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 110 с.

19. Вержбицкий В.М. (2013). Численные методы математической физики: учебное пособие /В.М.Вержбицкий. - М: Директ.-Медиа, 212 с. <http://biblioclub.ru/>

20. Вознесенский Е. А. (1999). Динамическая неустойчивость грунтов. Москва: УРСС Эдиториал, 263 с.

21. Волков Е.А. (2007). Численные методы: учебное пособие / Е.А. Волков. - 4 –е изд., стер.– СПб.: Лань., 256 с.
22. Гусев А.А. (2011). О принципах картирования сейсмоопасных регионов Российской Федерации и нормирования сейсмических нагрузок в терминах сейсмических ускорений (Часть 1). Инженерные изыскания, 10, 20–29.
23. Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200 000. Аркуш М-36-ХІІІ Київ. (2001). Ред. Зосимович В.Ю., Гожик П.Ф. Київ, Міністерство екології та природних ресурсів України, Департамент геології та використання надр, Північне державне регіональне геологічне підприємство «Північгеологія», Державне науково-виробниче підприємство (ДНВП) "Геоінформ України" https://geoinf.kiev.ua/wp/kartograma_rep.php?listn=m36-13
24. Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. (2004). «Петрофизика» Учебник для вузов/ Под ред. Д.А.Кожевникова– 2-е издание, перераб. И доп. - М: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 368 с.
25. Дортман Н. Б. (1984). Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Москва: Недра, 455 с.
26. Кендзера А.В., Семенова Ю.В. (2021a). Вариации интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний на территории Киева. Геофизический журнал, 1(43), 129-141. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225543>.
27. Кендзера О.В., Вербицкий С.Т., Семенова Ю.В., Вербицька О.С. (2016). Стан і проблеми розвитку сейсмологічних досліджень для сейсмостійкого проектування. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 65, 83-189.
28. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2019). Расчетные акселерограммы для прямого динамического метода определения сейсмических нагрузок // Геофизический журнал, 41, 4, 210-216. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177389>

29. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2021б). Спектральне підсилення сейсмічних коливань ґрунтами на території Києва. Допов. Нац. акад. наук Укр., 2, 65 - 70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.11.065>.
30. Ладынин А.В. (2010). Физические свойства горных пород. Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 110 с.
31. Національний стандарт ДСТУ-Б-В.1.1-28:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності» (2010). Київ: Держбуд України, 78 с.
32. Семенова Ю.В. (2021б). Методы учета влияния местных грунтовых условий на сейсмическую опасность строительной площадки // Sciences of Europe, 3(63), 10-14. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-63-3-10-14.
33. Справочник физических констант горных пород (1969). Под ред. С. Кларка мл. Москва: Мир, 543 с.
34. Уломов В. И. (2008). О сейсмических воздействиях на высотные здания и сооружения г. Москвы. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2, 24—65.
35. Уломов В.И., Шумилина Л.С. (1999). 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 сейсмоопасных районах. Москва: ОИФЗ, 57 с.
36. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика под редакцией Н.Б. Дортман. (1984). Москва: Недра, 455 с.

РОЗДІЛ 6. СЕЙСМІЧНА РЕАКЦІЯ СЕЙСМОГЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ҐРУНТІВ В ОСНОВІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ СПОРУД

Основною причиною руйнування будівель і споруд під час землетрусів є їх реакція на сейсмічні коливання ґрунтової основи. Тому прогноз, моделювання та аналіз сейсмічної поведінки ґрунтів при землетрусах на конкретних ділянках завжди були ключовою задачею концепції сейсмостійкого проєктування і будівництва та набуває ще більшого значення з появою нових, більш досконаlih чисельних методів. Стратегія сейсмічного захисту передбачає впровадження сейсмостійкого проєктування і будівництва житла та потенційно небезпечних об'єктів на базі об'єктивних знань про кількісні параметри реально існуючої сейсмічної небезпеки на конкретних будівельних майданчиках. В рішенні РНБО, яке введено в дію Указом Президента України № 585/2011 від 12 травня 2011 р., наголошено на необхідність проведення поглибленої переоцінки стану безпеки енергоблоків АЕС України, включаючи перевірку їх сейсмостійкості. Згідно вимог МАГАТЕ [NS-G-2.13, 2014; SSG-25,2014], для виконання надійного і реалістичного аналізу сейсмічної реакції, характерної для майданчика, повинна бути розроблена методика співвіднесення типів ґрунтів до прийнятої типової класифікації при заданні в математичних моделях шаруватого ґрунту параметрів залежних від рівня деформації. Розроблена дисертантом методика побудови математичних моделей шаруватого ґрунту з параметрами залежними від рівня деформації була впроваджена при визначенні сейсмічної небезпеки ряду відповідальних об'єктів на території України. В розділі представлено результати кількісної оцінки фізичних параметрів реакції ґрунтової основи відповідальних споруд територій Ташлицької ГАЕС Канівської ГЕС, Запорізької АЕС, Южно-Української АЕС, Середньодніпровської ГЕС та компресорної станції «Яготин» на сейсмічні впливи з урахуванням особливостей нелінійного деформування ґрунтів.

6.1. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території Ташлицької гідроакумулюючої станції

В розділі приведено результати чисельного моделювання сейсмічної реакції ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Ташлицької гідроакумулюючої станції (ГАЕС) на максимально можливі сейсмічні впливи в даному регіоні з врахуванням нелінійних явищ. Ґрунтова товща складена осадовими відкладами і середньо та інтенсивно вивітленими граніто-гнейсами. В результаті проведення робіт з сейсмічного мікрорайонування за трьома методами: методу сейсмо-геологічних аналогій, методу сейсмічних жорсткостей і методу реєстрації землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм - в межах майданчика Ташлицької ГАЕС було умовно виділено 5 інженерно-геологічних районів, які характеризуються різними інженерно-геологічними і сейсмічними умовами, в тому числі і різною товщиною осадового чохла та граніто-гнейсів. На рис. 6.1 представлено схему розташування інженерно-геологічних районів, виділених на території Ташлицької ГАЕС.



Рис. 6.1 Схема розташування інженерно-геологічних районів на території Ташлицької гідро-акумулюючої станції (ГАЕС), виділених за результатами СМР комплексом з трьох методів: методу сейсмо-геологічних

аналогій, методом сейсмічних жорсткостей і методом реєстрації землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм.

Параметри усереднених сейсмо-геологічних моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів, виділених в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС наведені в таблицях 6.1-6.5.

Таблиця 6.1

Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району I (вододільна рівнина), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС

Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густини порід ρ , г/см ³
		Поздовжньої V_p , м/сек	Попереочної V_s , м/сек	Поздовжньої ν_p	Попереочної ν_s	
Ґрунтово-рослинний шар. Суглинок гумусований, твердий, середньої щільності, тріщинуватий	0 – 0,4	300*	205*	0,09*	0,2*	1,6*
Суглинок лесовидний від напівтвердого до м'якопластичного, щільний та середньої щільності, пухкий, тріщинуватий, пористий, з включенням карбонатів та лінз піску	0,4 – 8,0	1130	510	0,07	0,09	1,93

Глина (суглинок) напівтверда, тугопластична з лінзами глини м'якопластичної, включеннями карбонатів та гідроксидів марганцю	8,0-11,0	1200	576	0,05	0,06	1,97
Пісок кварцевий, різнозернистий, глинистий, озалізнений	11,0 – 15,8	1850	930	0,04	0,05	1,91
«Рухляки» – жорства, щебінь вивітрілого граніту з включеннями пісків	15,8- 17,0	1800	1010	0,15	0,2	1,96
Граніто-гнейс інтенсивно вивітрілий порфіробластичний	17,0 – 18,3	3600*	2200*	0,01	0,01	2,58
Граніто-гнейс порфіробластичний середньовивітрілий, тріщинуватий	18,3- 21,3	4300*	2600*	0,01	0,01	2,62
Граніто-гнейс порфіробластичний, відносно збережений, слабо тріщинуватий	21,3 - ∞	5000*	3000*	0,01	0,01	2,64

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

РГВ = 7,5 м.

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№ II (Ташлицька гребля), виділеного в межах території розміщення
основних споруд Ташлицької ГАЕС**

Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густини порід ρ , г/см ³
		Поздов жньої V_p , м/сек	Попере чної V_s , м/сек	Поздов жньої ν_p	Поперечн ої ν_s	
Техногенний ґрунт. Гірська маса: жорстка, щебінь з уламками граніту діаметром до 50 мм	0,0 – 1,5	395*	230*	0,08*	0,15*	1,65*
Техногенний ґрунт. Перешарування твердих легких і важких суглинків, з лінзами недоущільнених і м'якопластичних суглинків	1,5–54,4	1011	562	0,07	0,09	1,98
Граніто-гнейс порфіробластичний , інтенсивно вивітрілий	54,4-58,5	3600*	2200*	0,01	0,01	2,58
Граніто-гнейс порфіробластичний середньовивітрілий , тріщинуватий	58,5 – 91,7	4300*	2600*	0,01	0,01	2,64
Граніто-гнейс порфіробластичний , відносно збережений, слабо тріщинуватий	91,7 - ∞	5000*	3000*	0,01	0,01	2,67

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

РГВ = 5,2 м.

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№ III (греблі верхньої водойми Ташлицької ГАЕС), виділеного в межах
території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС**

Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густини порід ρ , г/см ³
		Поздовжньої V_p , м/сек	Попереочної V_s , м/сек	Поздовжньої ν_p	Попереочної ν_s	
Техногенний ґрунт. Суглинок з прошарками глин, неоднорідні, щільний і середньої щільності від твердого до м'якопластичного з включеннями будівельного сміття, гумусованих суглинків	0 – 8,0	447	360	0,08	0,1	1,93
Суглинок лесовидний від напівтвердого до м'якопластичного, щільний та середньої щільності, пухкий, тріщинуватий, пористий, з включенням карбонатів та лінз піску	8,0 – 13,0	1000	554	0,07	0,09	1,93

Глина (суглинок) напівтверда, тугопластична з лінзами глини м'якопластичної, включеннями карбонатів та гідроксидів марганцю	10,5 – 13,2	1200	590	0,05	0,06	1,97
Пісок кварцевий, різнозернистий, глинистий, озалізнений з лінзами глин	13,2 – 17,9	1850	890	0,04	0,05	1,91
«Рухляки» – жорства, щебінь вивітрілого граніту з включеннями пісків зеленувато-сірих	17,9 -18,0	1800	1010	0,15	0,2	1,96
Граніто-гнейс порфіробластичний, інтенсивно вивітрілий	18,0 – 29,0	3600*	2200*	0,01	0,01	2,58
Граніто-гнейс порфіробластичний середньовивітрілий, тріщинуватий	29,0- 35,0	4300*	2600*	0,01	0,01	2,62
Граніто-гнейс порфіробластичний, відносно збережений, слабо тріщинуватий	35,0 - ∞	5000*	3000*	0,01	0,01	2,64

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

РГВ = 4,2 м

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№ IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділеного в
межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС**

Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густини порід ρ , г/см ³
		Поздов жньої V_p , м/сек	Попере чної V_s , м/сек	Поздов жньої ν_p	Попере чної ν_s	
Ґрунтово-рослинний шар. Суглинок гумусований, твердий, середньої щільності, тріщинуватий	0 – 0,3	270*	190*	0,08*	0,15*	1,6*
Суглинок делювіальний: Жорства, гравій, валуни граніту з суглинистим	0,3 -2,0	580	358	0,08	0,1	1,89
Рухляки	2,0-4,0	1400	980	0,15	0,2	1,96
Граніто-гнейс порфіробластичний інтенсивно вивітрілий.	4,0-18,3	3600*	1600	0,01	0,01	2,58
Граніто-гнейс порфіробластичний середньовивітрілий, тріщинуватий	18,3-21,3	4300*	2600*	0,01	0,01	2,62
Граніто-гнейс порфіробластичний, відносно збережений, слабо тріщинуватий	21,3 - ∞	5000*	3000*	0,01	0,01	2,64

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

$$PGB = 1 \text{ м}$$

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№ V (засипана ділянка Ташлицької балки), виділеного в межах території
розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС**

Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Декременти поглинання сейсмічних хвиль		Густини порід ρ , г/см ³
		Поздов жньої V_p , м/сек	Попереч ної V_s , м/сек	Поздов жньої ν_p	Попереч ної ν_s	
Товща води	0 – 29,5	1500*	-	-	-	-
Техногенний ґрунт. Суглинок замулений з включеннями будівельного сміття	29,5 – 31,9	1010	485	0,08	0,1	1,93
Суглинок алювіальний мулистий, пластичний	31,9- 32,7	1120	540	0,07	0,08	1,97
Ендербіт інтенсивно вивітрілий. тріщинуватий	32,7- 56,0	3600	2200	0,01	0,01	2,58
Ендербіт середньовивітрілий, тріщинуватий	56,0- 74,0	4300	2600	0,01	0,01	2,62
Ендербіт відносно збережений, слабо тріщинуватий	74,0 - ∞	5000	3000	0,01	0,01	2,64

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

$$PGB = 0 \text{ м}$$

Розрахунки амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС проводилися з

використанням програмного комплексу ProShake [Proshake, 1998], розробленого для одномірного моделювання відгуку верхньої частини розрізу геологічного середовища на сейсмічні впливи. Частотні характеристики розраховувались з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів для п'яти моделей ґрунтового середовища інженерно-геологічних районів №1 – 5. Для кожної з моделей ґрунтового середовища результуюча АЧХ є як обвідною сімейства АЧХ, одержаних для різних випадків падіння з нижнього півпростору сейсмічних коливань (сейсмограм, велісограм і акселерограм) з різним спектральним складом і максимальними піковими прискореннями [Кендзера, Семенова, 2018].

При побудові АЧХ моделей геологічного середовища інженерно-геологічних районів №1 - 5 в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС використовувався метод еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи [Семенова, 2021г]. Поведінка кожного шару ґрунтової моделі при розрахунках задавалася моделлю Кельвіна – Фойгта (в'язко-пружною). Кожний шар ґрунтової моделі характеризувався такими параметрами, як: потужність шару, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, густиною, нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву дозволяють врахувати нелінійну поведінку ґрунтів під час землетрусу.

На рис. 6.2. приведено АЧХ для моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1 – 5 та їх обвідна.

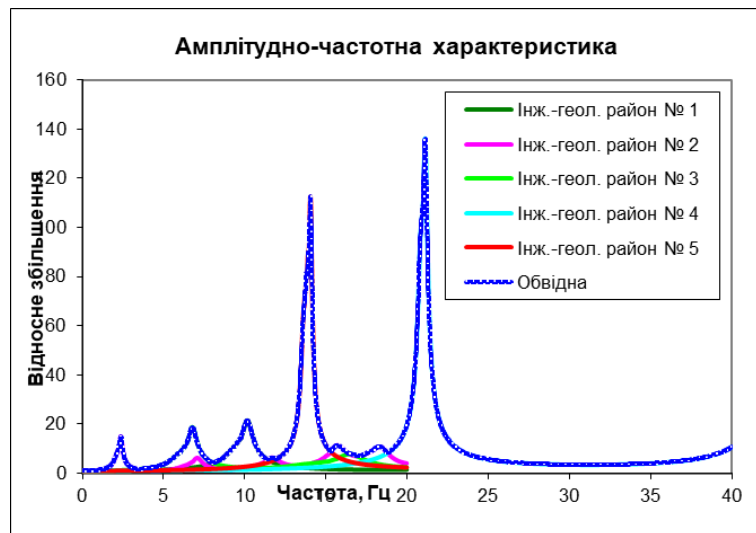


Рис. 6.2 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1-5 виділених в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС та їх обвідна

Частотні характеристики розраховано для випадку падіння поперечної хвилі знизу на підшву півпростору під досліджуваним майданчиком для інженерно-геологічних районів №1-5.

З рис. 6.2 видно, що найширшим частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами характеризується частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № II (Ташлицька гребля). Відмітимо також, що частотні характеристики моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № II (Ташлицька гребля) містить найбільший свій максимум в області низьких частот, порівняно з АЧХ інших інженерно-геологічного районів. Частотні характеристики моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділяється частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами в області достатньо високих частот [Кендзера, Семенова та ін., 2019].

На рис. 6.3 приведено Частотну характеристику моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №1 (вододільна рівнина), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС.



Рис. 6.3. Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного районів №1 (вододільна рівнина), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС

З рис. 6.3 видно, що частотні характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №1 (вододільна рівнина) характеризується одним максимумом резонансного підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами з частотним діапазоном від 9,32 Гц до 10,74 Гц.

На рис. 6.4 приведено частотну характеристику моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № II (Ташлицька гребля), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС.



Рис. 6.4. Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного районів району № II (Ташлицька гребля), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС

Частотна характеристика ґрунтового середовища інженерно-геологічного району № II (Ташлицька гребля), представлена на рис.6.4, характеризується широким частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 2,08Гц до 19,26Гц. В зазначеному частотному діапазоні спостерігаються чотири максимуми, з яких перший та останній мають досить великий коефіцієнт підсилення. Тому найбільші підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами інженерно-геологічного району № II (Ташлицька гребля) можуть спостерігатись в частотних діапазонах 2,08 - 2,54 Гц та 14,74-19,26 Гц. Максимуми з незначним коефіцієнтом підсилення спостерігаються в частотному діапазоні 6,32 – 7,64 Гц та 10,66 – 19, 26 Гц.

На рис. 6.5 приведено частотну характеристику моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № III (греблі верхньої водойми Ташлицької ГАЕС), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС.

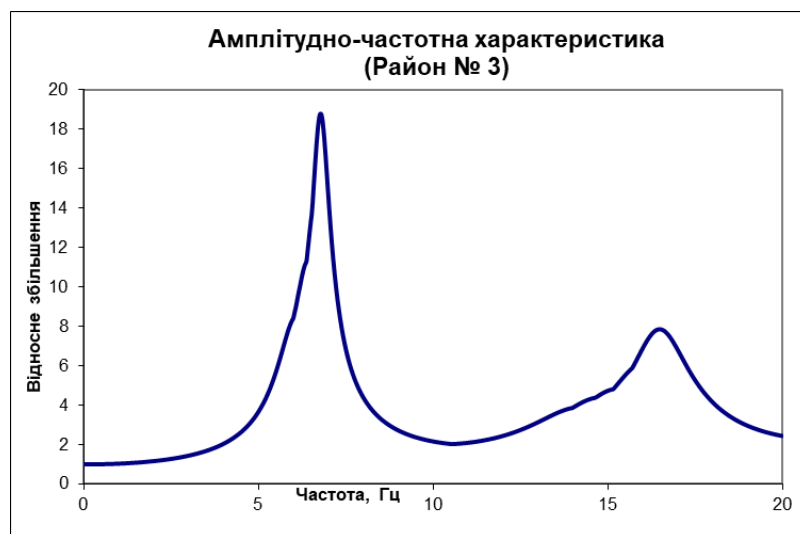


Рис. 6.5. Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № III (греблі верхньої водойми Ташлицької ГАЕС), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС

Частотна характеристика ґрунтового середовища інженерно-геологічного району № III (греблі верхньої водойми Ташлицької ГАЕС), характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними

грунтовими умовами від 6,12 Гц до 18,12 Гц. В зазначеному частотному діапазоні спостерігаються два максимуми, з яких перший має значно більший коефіцієнт підсилення. Тому найбільші підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами інженерно-геологічного району № III (греблі верхньої водойми Ташлицької ГАЕС), можуть спостерігатись в частотному діапазоні 6,12 – 7,26 Гц. Другий максимуми з незначним коефіцієнтом підсилення спостерігається в частотному діапазоні 14,04 – 18,12 Гц

На рис. 6.6 приведено частотну характеристику моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС.

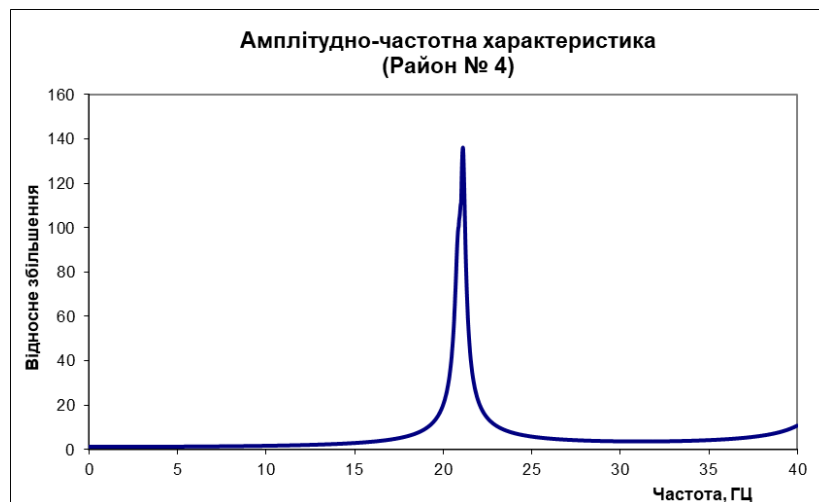


Рис. 6.6. Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС

З рис. 6.6 видно, що частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № IV (днище незатопленої частини Ташлицької балки), характеризується одним чітким максимумом резонансного підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами. Максимум має досить великий коефіцієнт підсилення сейсмічних коливань, та вузький частотний діапазон з частотним діапазоном від 20,66 Гц до 21,36 Гц.

На рис. 6.7 приведено частотну характеристику моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № V (засипана ділянка Ташлицької балки), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС.

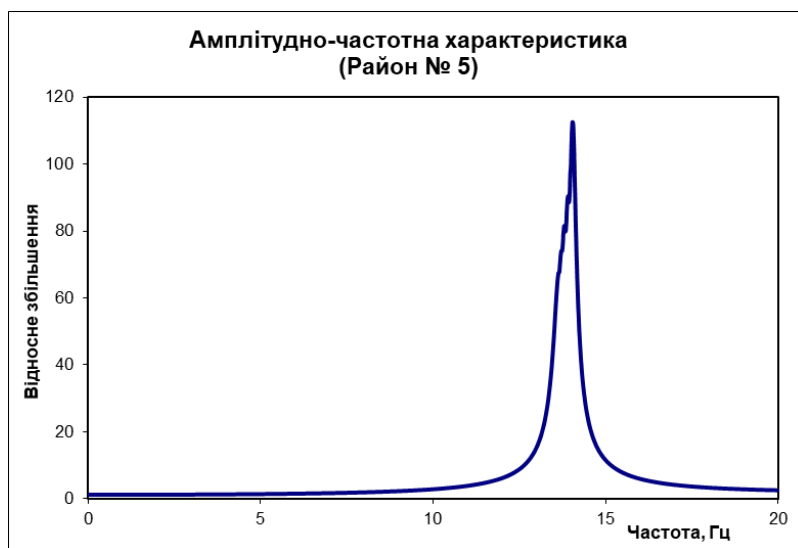


Рис. 6.7 Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного № V (засипана ділянка Ташлицької балки), виділеного в межах території розміщення основних споруд Ташлицької ГАЕС

Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району № V (засипана ділянка Ташлицької балки), характеризується одним чітким максимумом резонансного підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами. Максимум має досить великий коефіцієнт підсилення сейсмічних коливань, та вузький частотний діапазон з частотним діапазоном від 13,54 Гц до 14,22 Гц.

Аналіз розрахованих частотних характеристик моделей ґрунтових товщ досліджуваних ділянок, вказує на значний розкид коефіцієнта підсилення. Це, очевидно, є наслідком нелінійної поведінки ґрунтів і їх фільтруючих властивостей. Можна стверджувати, що пошуки одної чіткої залежності, яка б пов'язувала тип ґрунту, чи його категорію за сейсмічними властивостями, з очікуваними максимальними прискореннями є не продуктивними. Така залежність буде відображати лише загальні тенденції. При прогнозуванні небезпечних (для конкретних об'єктів) сейсмічних впливів необхідно будувати частотні характеристики, які описують їх складну залежність від будови

грунтових умов, від впливу реологічних властивостей кожного із шарів ґрунту під досліджуваними майданчиками при сейсмічних впливах різної величини.

6.2. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС

Середньодніпровська ГЕС розташована в межах північно-східного схилу Українського щита. Територія на якій споруджені об'єкти ГЕС відчуває сейсмічний вплив в основному від землетрусів, які відбуваються в області Карпат, Криму та платформенної частини України. Домінуючий вплив мають Карпатські землетруси, які виникають на контакті Південних і Східних Карпат (гори Вранча). Кримські землетруси і землетруси платформенної частини України, в меншій мірі, але можуть бути відчутними [Сейсмический риск, 1981; Харитонов, Костюк та ін..., 1996; Сафронов, 2003; Сейсмичность..., 1995].

В межах ділянки території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС під час сейсмічного мікрорайонування було виділено 3 інженерно-геологічні райони №1 (правобережна гребля), №2 (будівля ГЕС, водозливна гребля), №3 (лівобережна гребля).

До складу Середньодніпровського гідровузла входять наступні споруди (рис. 6.8).

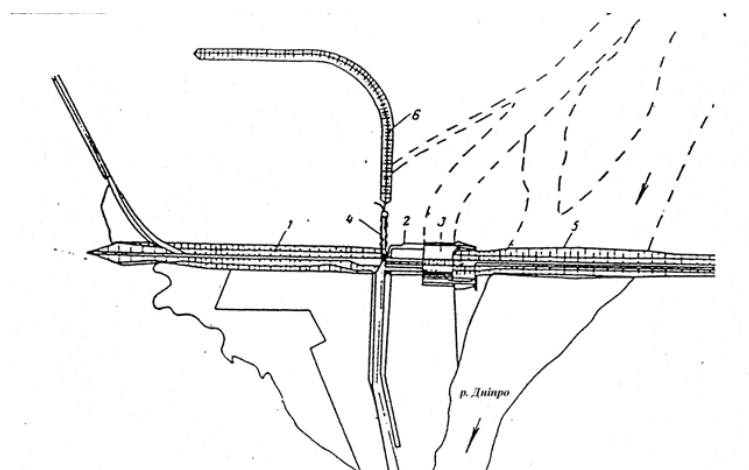


Рис. 6.8 Схематичний план гідровузла Середньодніпровської ГЕС.

1 – правобережна гребля; 2 – будівля ГЕС; 3 – водозливна гребля; 4 – шлюз; 5 – лівобережна гребля; 6 – дамба хвильолому.

Русло та лівий берег перекриваються земляною греблею довжиною 4770 м та висотою до 15 м, спорудженою засобами гідромеханізації. До земляної греблі бетонна водозливна гребля, що має довжину 200 м та будівельну висоту 30 м. Споруда гідроелектростанції довжиною 265 м розташована за водозливом і також є напірною спорудою. Далі розташована земляна гребля-вставка довжиною 160 м, що відділяє споруду ГЕС від шлюзу. З другої сторони до шлюзу примикає правобережна земляна гребля довжиною 2100 м, що закінчує напірний фронт на правому березі.

На лівому березі, майже паралельно руслу, розташована невисока дамба, що простягається на 30 м, і яка служить для захисту цінних земель від затоплення.

Бетонні споруди Середньодніпровського гідрокомплексу – споруда ГЕС, водозливна гребля та шлюз – розташовані на скельних породах Українського кристалічного щита, складеного допалеозойськими біотитовими і роговообманковими гнейсами та гранітогнейсами (рис. 6.9).

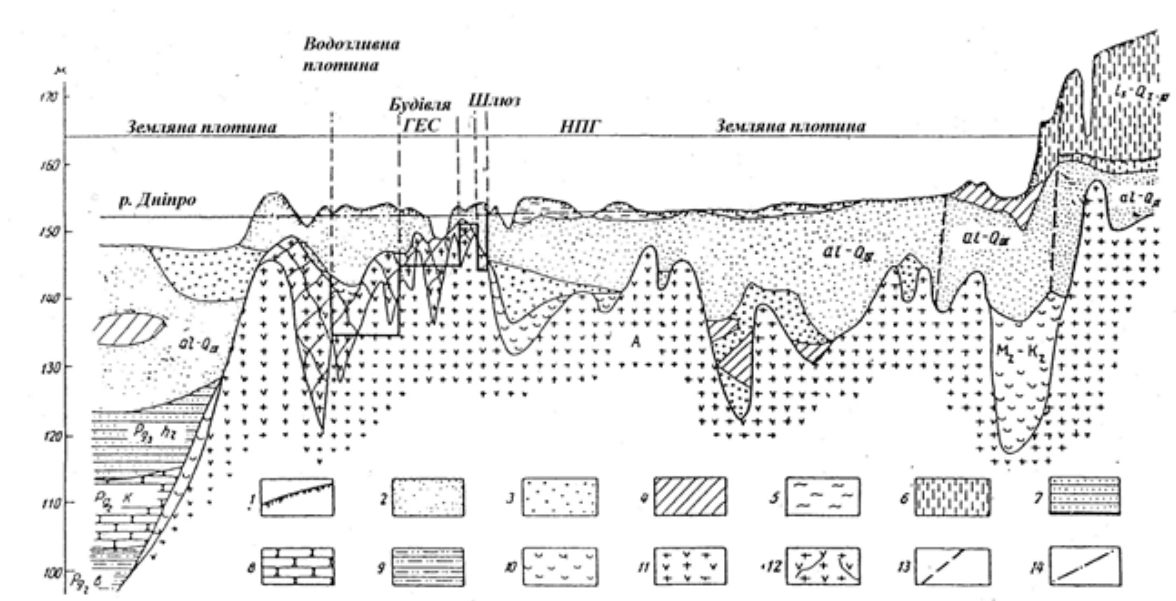


Рис. 6.9. Геологічний розріз по осі правобережної земляної греблі та бетонних споруд Середньодніпровської ГЕС.

1 – ґрунт та похований ґрунт; 2 – алювіальний мілко зернистий пісок; 3 – алювіальний середньозернистий пісок з гравієм, галькою та щебенем у піску; 4 – алювіальні супіски та глини; 5 – алювіальні мулисті суглинки; 6 – лесовидні

суглинки та супіски; 7 – харківські глини, глинисті глауконітові піски та пісковики; 8 – київські вапнякові пісковики та піски; 9 – бучакські піски, глини та буре вугілля; 10 – елювій докембрійський кристалічних порід – сапроліти різного складу; 11 – докембрійські гнейси, гранітогнейси та граніти; 12 – докембрійські тріщинуваті гнейси, гранітогнейси та граніти; 13 – похований уступ надпойменої тераси р. Дніпра; 14 – рівень ґрунтових вод.

У верхній частині масиву кристалічні породи змінені процесами вивітрювання. По ступеню вивітреності виділяються три зони.

Процеси вивітрювання протікали досить нерівномірно і в межах верхньої зони можна зустріти глиби та ділянки майже не вивітрілої міцної кристалічної породи, уламки та щебінь, в тій чи іншій степені вивітрілих порід у глинисто-піщаній масі та, нарешті, зв'язну глинисту породу, збагачену зернами кварцу. Потужність верхньої зони вимірюється зазвичай декількома метрами, збільшуючись місцями до 30 м.

Середня зона характеризується підвищеною тріщинуватістю та складена порівняно міцними та слабо вивітрілими породами, розбитими на дрібні блоки густою сіткою тріщин вивітрювання, відкритих або заповнених продуктами руйнування кристалічних порід або привнесеним зовні матеріалом. У цій зоні найбільш вивітрілими є частини блоків, що примикають до тріщин. З глибиною тріщинуватість затухає [Рябенко, 1974; Сучасна динаміка..., 2005].

У нижній, монолітній, зоні рідкі, більшою мірою, закриті тріщини розбивають породу на крупні блоки. Породи міцні, без слідів вивітрювання.

Бетонні споруди гідровузла врізані переважно у породи середньої зони і тільки на окремих ділянках в основі споруд залишилися інтенсивно вивітрілі граніти та гранітогнейси верхньої зони потужністю до кількох метрів.

Земляні споруди гідровузла – правобережна та лівобережна греблі (рис. 6.9) та лівобережна огорожуюча дамба – розташовані на I та II терасах у руслі Дніпра. Загальна потужність алювію цих терас змінюється від нуля до 35 м. Річкові відкладення на правому березі підстеляються породами кристалічного

фундаменту, на лівому та у руслі – харківськими піщано-глинистими відкладами. У складі алювію переважають дрібнозернисті жовто-сірі та сірі піски, місцями озалізнені. Піщана товща, переважно у нижній частині, містить крупні лінзи та прошарки середньозернистого піску з галькою, що виклинюються, а також прошарки щебеню, гальки та гравію у різнозернистому піску. Потужність цих лінз та прошарків зазвичай вимірюється 1-2 м, досягаючи максимуму у руслі ріки (близько 20 м).

Огороджуюча дамба на лівому березі примикає до складеного дрібнозернистими пісками схилу високої ділянки II тераси, стійкість якої сумніву не викликає.

Примикання правобережної земляної греблі являє собою схил IV тераси, складеної потужною товщею лесовидних просідних суглинків та супісків (коефіцієнт просадки дорівнює 0,024-0,140), яка покриває піщано-суглинистий алювій. Схил на ділянці примикання прорізаний глибоким яром.

На рис. 6.10 приведено схему розташування інженерно-геологічних районів (таксонометричних ділянок), виділених за методом сейсмогеологічних аналогій на території майданчика розташування гідротехнічних споруд Середньодніпровської ГЕС. У подальшому такий розподіл інженерно-геологічних районів було підтверджено за результатами СМР досліджуваної території інструментальними методами.

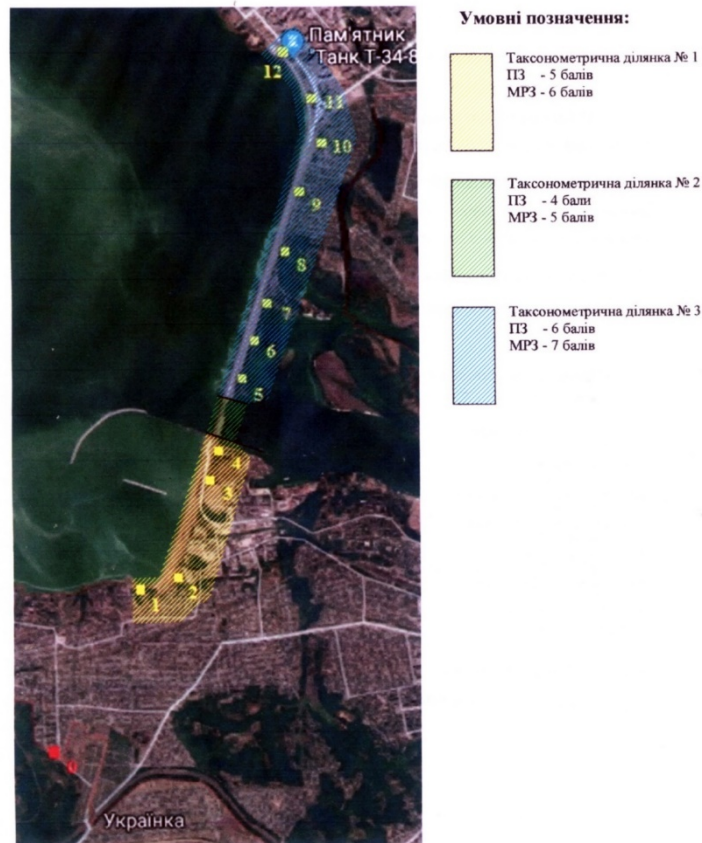


Рис. 6.10 Інженерно-геологічні райони виділені на території майданчика розташування гідротехнічних споруд Середньодніпровської ГЕС та схеми розташування пунктів інструментальних досліджень.

На рис. 6.10 приведено також значення проектного і максимального розрахункового землетрусів, розраховані із застосуванням методів загального сейсмічного районування, детального сейсмічного районування та методу сейсмо-геологічних аналогій. На цьому ж рисунку показано пункти розстановки апаратури при проведенні СМР майданчика методом сейсмічних жорсткостей.

Для інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 були побудовані усереднені моделі геологічного середовища.

Для оцінки впливу товщі осадових порід використовувалися одномірні (горизонтально шаруваті моделі середовища), що цілком допустимо в умовах близько горизонтального залягання основних геологічних елементів осадової товщі.

Геометричні параметри моделі оцінювалися на основі апріорної інженерно-геологічної інформації. Моделі геологічного територію розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС для інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 будувалися як горизонтально-шаруваті і вертикально-неоднорідні. Вихідні дані для побудови моделей були взяті з технічного звіту з інженерно-геологічних вишукувань досліджуваного майданчика.

Параметри усередненої моделі геологічного середовища для інженерно-геологічного району №1 територію розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС наведені в Таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№1 Середньодніпровської ГЕС (правобережна гребля)**

Літологічний склад	Інтервал глибин, м	Густина порід ρ (г/см ³)	Швидкість сейсмічних хвиль	
			V_p (м/с)	V_s (м/с)
Піски намиті в правобережну плотину	0 – 16	1,62	450 – 500	300 – 350
Алювіальні дрібнозернисті та середньозернисті піски з прошарками супіску та суглинку	16 – 32	1,66	1200 – 1300	350 – 400
Докембрійські гнейси, граніто-гнейси і граніти, тріщинуваті, вивітрілі	32 – 40	2,2	1800 – 2000	800 – 1200
Гнаніто-гнейси щільні	40 – ∞	2,6	2500 – 3500	1400 – 1600

Параметри усередненої моделі геологічного середовища для інженерно-геологічного району №2, виділеного в межах територію Середньодніпровської ГЕС наведені в Таблиці 6.7.

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№ 2 Середньодніпровської ГЕС (будівля ГЕС, водозливна гребля)**

Літологічний склад	Інтервал глибин в м	Густина порід ρ (г/см ³)	Швидкість сейсмічних хвиль	
			V_p (м/с)	V_s (м/с)
Граніто-гнейси докембрійські, нерозчленовані, міцні	0 – 37	2,6	2500 – 3500	1400 – 1600

Параметри усередненої моделі геологічного середовища для інженерно-геологічного району №3 території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС наведені в Таблиці 6.8.

**Усереднена модель ґрунтової товщі інженерно-геологічного району
№ 3 Середньодніпровської ГЕС (лівобережна гребля)**

Літологічний склад	Інтервал глибин, м	Густина порід ρ (г/см ³)	Швидкість сейсмічних хвиль	
			V_p (м/с)	V_s (м/с)
Піски намивні різнозернисті в тілі плотини	0 – 14	1,62	350 – 450	300 – 350
Пісок кварцовий, дрібний і пілуватий, з детритом прісноводної ракушки	14 – 36	1,6	1200 – 1300	350 – 400
Пісковик кварцовий, слабозцементований глауконітовий	36 – 42	1,88	1400 – 1500	800 – 1000
Глина темно-зелена, глауконітова, піщана з прошарками піску	42 – 68	1,92	1200 – 1600	1000 – 1200
Докембрійські гнейси, граніто-гнейси і граніти, тріщинуваті, вивітрілі	68 – 80	2,2	1800 – 2000	800 – 1200
Граніто-гнейси щільні	80 – ∞	2,6	2500 – 3500	1400 – 1600

Розрахунки амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) моделей ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС проведено з використанням програмного комплексу ProShake [ProShake, 1998; Schnabel P.V. et. al. 1972], розробленого для одномірного моделювання відгуку верхньої частини розрізу геологічного середовища на сейсмічні впливи. АЧХ розраховано для трьох моделей ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №1 (правобережна гребля), №2 (будівля ГЕС, водозливна гребля) та №3 (лівобережна гребля). Вихідні дані для побудови АЧХ було взято з таблиць 6.7 - 6.8 та бази даних деформаційних характеристик ґрунтів (залежності модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації).

При побудові АЧХ моделей геологічного середовища інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС використовувався метод еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи. Поведінка кожного шару ґрунтової моделі при розрахунках задавалася моделлю Кельвіна – Фойгта (в'язко-пружною) [Kramer, 1996; Wave fields..., 2015]. Кожний шар ґрунтової моделі характеризувався такими параметрами, як: потужність шару, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, густиною, нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву дозволяють врахувати нелінійну поведінку ґрунтів під час землетрусу.

На рис. 6.11 приведено амплітудно-частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС.

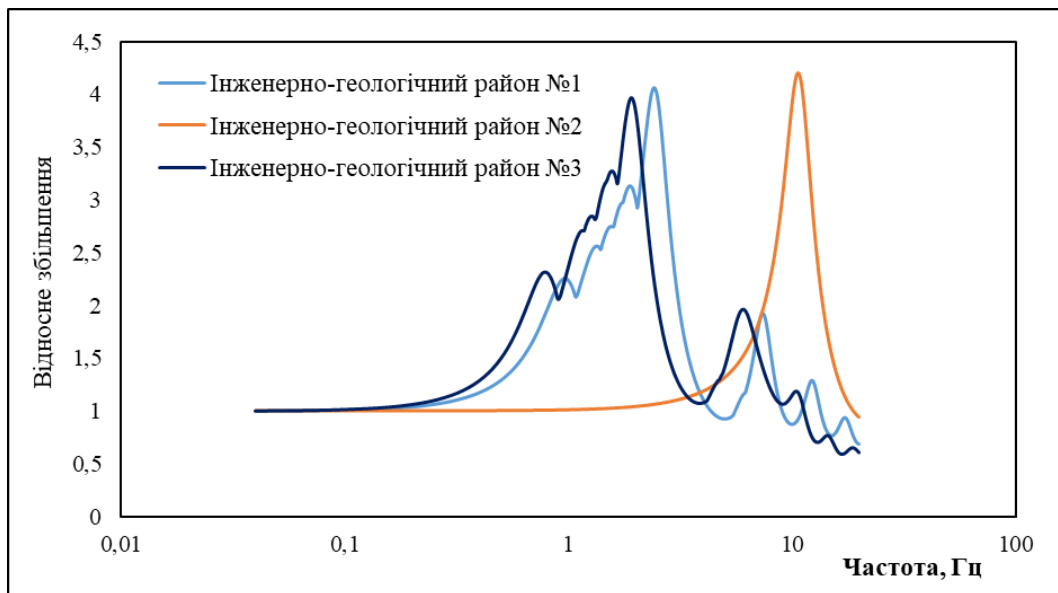


Рис. 6.11 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС

З рис. 6.11 видно, що інженерно-геологічний район №2 характеризується вибіркоvim підсиленням сейсмічних коливань місцевими ґрунтами в більш високочастотному діапазоні порівняно з інженерно-геологічними районами №1 та №3.

АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №1 (правобережна гребля) території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,82 Гц до 3,12 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливань 4,06.

АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №2 (будівля ГЕС, водозливна гребля) території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 7,72 Гц до 13,58 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливань 4,2. АЧХ моделі середовища інженерно-геологічного району №2 характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення сейсмічних коливань в межах досить

високих частот, що пов'язано з виходом граніто-гнейсу на вільну поверхню в межах даного району.

АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №3 (лівобережна гребля). території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,72 Гц до 2,42 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливань 3,97.

Таким чином, амплітудно-частотні характеристики ґрунтових масивів трьох ділянок основних споруд Середньодніпровської ГЕС є дещо відмінними. Ці фактори необхідно враховувати для уникнення можливих резонансних ефектів.

На рис. 6.12 представлено амплітудні спектри Фур'є прискорень поверхні ґрунтової товщі трьох інженерно-геологічних районів території Середньодніпровської ГЕС, розраховані по максимальних значеннях спектрів Фур'є на поверхні 26 вхідних сейсмічних рухів з різною амплітудою та спектральним складом.

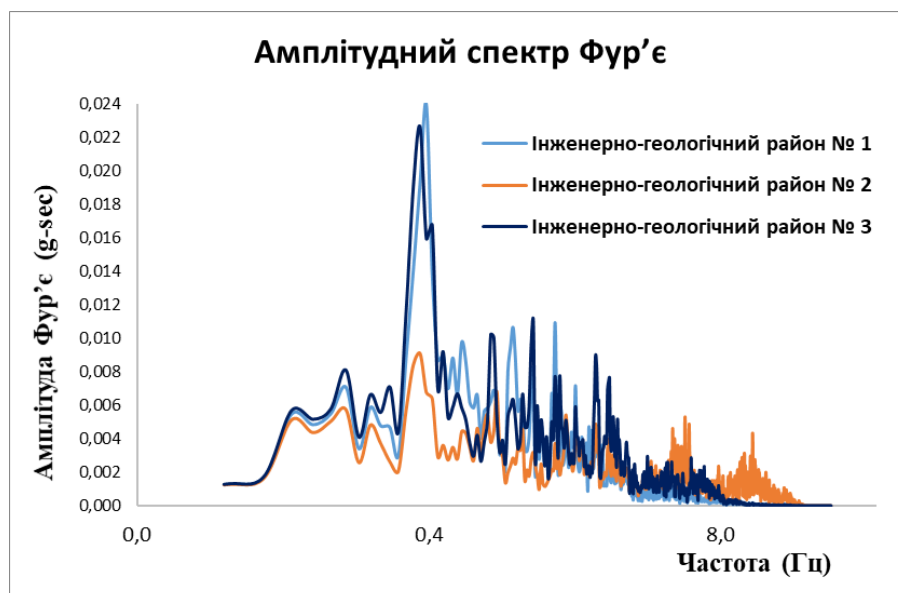


Рис. 6.12 Максимальні амплітудні спектри Фур'є прискорень коливань ґрунту на поверхні інженерно-геологічних районів №1, №2 і №3 території Середньодніпровської ГЕС, розраховані для 26 вхідних сейсмічних

Амплітудні спектри Фур'є прискорень коливань ґрунту, представлені на рис. 6.12 демонструють різницю прояву землетрусів на вільній поверхні інженерно-геологічних районів №1, №2 і №3 в межах території Середньодніпровської ГЕС. Максимуми амплітудних значень спектрів Фур'є коливань ґрунту на поверхні інженерно-геологічних районів №1, №2 і №3 по частоті відповідають приблизно 0,4 Гц. При цьому амплітудні рівні максимумів інженерно-геологічних районів №1, №2 мають схожі значення 0,023-0,024g, а інженерно-геологічного району №3 амплітудний рівень максимуму значно нижчий біля 0,09g.

Відповідно до отриманих результатів, порівнюючи сейсмічні умови трьох інженерно-геологічних районів, в сейсмічному відношенні кращими показниками характеризується район №3 [Семенова, 2021в].

Для кожного інженерно-геологічного району території розташування основних споруд Середньодніпровської ГЕС побудовано по 3 реалізації трикомпонентних розрахункових акселерограм для моделювання максимальних розрахункових землетрусів (один раз в 5000 років) та проектних землетрусів (один раз в 500 років) із локальних потенційно сейсмоактивних зон. При їх генеруванні використовувалися різні комбінації теоретичних обвідних спектрів розрахункових акселерограм, нормованих частотних характеристик геологічного середовища під майданчиком і фазових спектрів різних записів близьких землетрусів, модифікованих з врахуванням умов майданчика. Основні параметри розрахункових акселерограм для моделювання розрахункових і проектних землетрусів з близьких вогнищевих зон на території розташування основних споруд Середньодніпровської ГЕС, представлені в Таблицях 6.9–6.14.

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання МРЗ із місцевих потенційно сейсμοактивних зон на вільній поверхні інженерно-геологічного району №1 території розташування основних споруд

Середньодніпровської ГЕС

№ ПП	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонен та коливань	Макс. прискоренн я, a_m , в cm/c^2	Переважаю чі частоти, $Гц$		Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.9$ a_m в сек.	Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кільк. відлікі в в акселе - рогра мі	Дискре т-ність акселе- рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	AAM10C_ T	T	49.8	3.4	14.3	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM10C_ R	R	41.8	2.9	13.2	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM10C_ Z	Z	34.4	4.3	9.6	0.8	1.7	4096	0.02000
1	AAM11C_ T	T	50.0	5.9	13.2	0.8	4.1	4096	0.02000
	AAM11C_ R	R	46.5	2.3	13.2	0.8	5.0	4096	0.02000
	AAM11C_ Z	Z	33	4.7	13.2	0.8	3.3	4096	0.02000
2	AAM12C_ T	T	50.2	5.5	11.2	0.8	1.7	4096	0.02000
	AAM12C_ R	R	44.2	2.7	11.2	0.8	1.7	4096	0.02000
	AAM12C_ Z	Z	39.7	2.3	13.2	1.7	2.5	4096	0.02000

**Параметри розрахункових акселерограм для моделювання ПЗ із
місцевих потенційно сейсмоактивних зон на вільній поверхні інженерно-
геологічного району №1 території розташування основних споруд
Середньодніпровської ГЕС**

№ ПП	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонен та коливань	Макс. прискоренн я, a_m , в cm/c^2	Переважаю чі частоти, $Гц$		Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.9$ a_m в сек.	Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кільк. відлікі в в акселе рогра мі	Дискре т-ність акселе рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	AAP10C_ T	T	25.0	2.5	18.2	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP10C_ R	R	20.3	0.7	18.2	0.4	2.1	4096	0.01000
	AAP10C_ Z	Z	16.8	1.7	18.2	1.2	3.3	4096	0.01000
1	AAP11C_ T	T	25.2	2.5	18.2	0.8	1.2	4096	0.01000
	AAP11C_ R	R	22.2	0.5	16.8	0.4	1.2	4096	0.01000
	AAP11C_ Z	Z	18.1	2.7	19.7	0.4	2.5	4096	0.01000
2	AAP12C_ T	T	20.3	0.9	15.5	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP12C_ R	R	17.9	0.5	16.8	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP12C_ Z	Z	14.5	2.5	18.2	0.4	2.1	4096	0.01000

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання МРЗ із місцевих потенційно сейсмоактивних зон на вільній поверхні інженерно-геологічного району №2 території розташування основних споруд

Середньодніпровської ГЕС

№ ПП	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонен та коливань	Макс. прискоренн я, a_m , в cm/c^2	Переважаю чі частоти, $Гц$		Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.9$ a_m в сек.	Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кільк. відлікі в в акселе - рогра мі	Дискре т-ність акселе- рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	AAM10C_ T	T	25.2	7.0	14.3	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM10C_ R	R	21.9	4.7	14.3	0.8	3.3	4096	0.02000
	AAM10C_ Z	Z	15.9	5.9	13.2	0.8	2.5	4096	0.02000
1	AAM11C_ T	T	25.0	5.9	13.2	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM11C_ R	R	23.8	5.5	13.2	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM11C_ Z	Z	17.5	5.5	13.2	1.7	2.5	4096	0.02000
2	AAM12C_ T	T	24.7	4.7	12.2	0.8	4.1	4096	0.02000
	AAM12C_ R	R	21.5	5.5	15.5	0.8	6.6	4096	0.02000
	AAM12C_ Z	Z	17.5	5.5	14.3	0.8	4.1	4096	0.02000

**Параметри розрахункових акселерограм для моделювання ПЗ із
місцевих потенційно сейсмоактивних зон на вільній поверхні інженерно-
геологічного району №2 території розташування основних споруд
Середньодніпровської ГЕС**

№ ПП	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонен та коливань	Макс. прискоренн я, a_m , в cm/c^2	Переважаю чі частоти, $Гц$		Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.9$ a_m в сек.	Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кільк. відлікі в в акселе - рогра мі	Дискре т-ність акселе- рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	AAP10C_ T	T	12.2	6.4	14.3	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP10C_ R	R	10.2	6.4	15.5	0.4	1.2	4096	0.01000
	AAP10C_ Z	Z	7.6	5.9	14.3	0.8	2.1	4096	0.01000
1	AAP11C_ T	T	12.8	5.9	14.3	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP11C_ R	R	10.6	7.0	14.3	0.4	1.2	4096	0.01000
	AAP11C_ Z	Z	10	7.0	15.5	0.8	2.5	4096	0.01000
2	AAP12C_ T	T	12.5	5.5	14.3	0.8	1.7	4096	0.01000
	AAP12C_ R	R	11.6	4.0	15.5	0.4	1.7	4096	0.01000
	AAP12C_ Z	Z	9.1	7.0	11.2	0.4	1.2	4096	0.01000

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання МРЗ із місцевих потенційно сейсмоактивних зон на вільній поверхні інженерно-геологічного району №3 території розташування основних споруд

Середньодніпровської ГЕС

№ ПП	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонен та коливань	Макс. прискоренн я, a_m , в cm/c^2	Переважаю чі частоти, $Гц$		Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.9$ a_m в сек.	Трив а- лість коли- вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кільк. відлікі в в акселе - рогра мі	Дискре т-ність акселе- рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	AAM10C_ T	T	99.8	3.4	11.2	0.8	4.1	4096	0.02000
	AAM10C_ R	R	92.8	4.3	9.6	0.8	1.7	4096	0.02000
	AAM10C_ Z	Z	75.8	3.4	11.2	0.8	2.5	4096	0.02000
1	AAM11C_ T	T	100.4	3.7	11.2	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM11C_ R	R	89.4	3.7	10.4	0.8	2.5	4096	0.02000
	AAM11C_ Z	Z	72.3	3.7	12.2	0.8	2.5	4096	0.02000
2	AAM12C_ T	T	100.2	3.7	11.2	0.8	3.3	4096	0.02000
	AAM12C_ R	R	80.2	3.7	9.6	0.8	1.7	4096	0.02000
	AAM12C_ Z	Z	63.1	3.7	10.4	0.8	3.3	4096	0.02000

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання ПЗ із місцевих потенційно сейсмоактивних зон на вільній поверхні інженерно-геологічного району №3 території розташування основних споруд Середньодніпровської ГЕС

№ ПП	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонента коливань	Макс. прискорення, a_m , в cm/c^2	Переважаючі частоти, $Гц$		Тривалість коливань, $a \geq 0.9 a_m$ в сек.	Тривалість коливань, $a \geq 0.5 a_m$ в сек.	Кільк. відліків в акселерограмі	Дискретність акселерограм Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	AAP10C_T	T	49.8	4.3	12.2	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP10C_R	R	42.8	2.9	12.2	0.4	2.1	4096	0.01000
	AAP10C_Z	Z	36.9	4.0	12.2	0.8	1.7	4096	0.01000
1	AAP11C_T	T	50.0	3.7	12.2	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP11C_R	R	47	2.5	12.2	0.4	2.1	4096	0.01000
	AAP11C_Z	Z	30	4.7	10.4	0.4	1.2	4096	0.01000
2	AAP12C_T	T	50.2	4.0	14.3	0.4	1.2	4096	0.01000
	AAP12C_R	R	41.2	1.9	13.2	0.4	0.8	4096	0.01000
	AAP12C_Z	Z	37.1	3.4	13.2	0.4	1.7	4096	0.01000

На рис. 6.13 зображено приклад графіків трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання локального розрахункового землетрусу на вільній поверхні інженерно-геологічного району №3 території розташування основних споруд Середньодніпровської ГЕС.

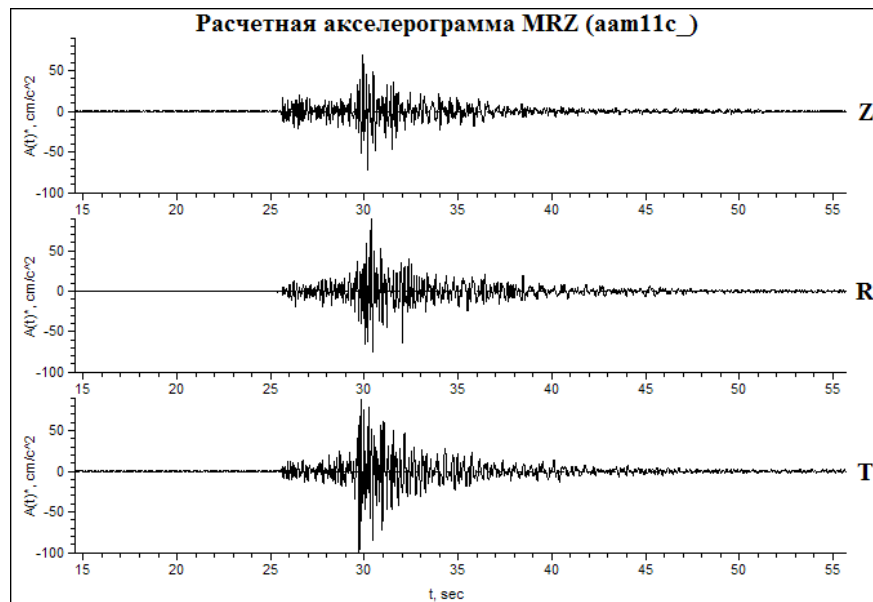


Рис. 6.13. Графік трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання МРЗ з місцевої вогнищевої зони на вільній поверхні інженерно-геологічного району №3 території розташування основних споруд Середньодніпровської ГЕС

6.3. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Южно-Української АЕС

В результаті проведення робіт з сейсмічного мікрорайонування (СМР) за трьома методами: методу сейсмо-геологічних аналогій, методу сейсмічних жорсткостей і методу реєстрації землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм - в межах території розміщення основних споруд ВП «Южно-Українська АЕС» було умовно виділено 3 інженерно-геологічні райони (таксонометричні ділянки), які характеризуються різними інженерно-геологічними і сейсмічними умовами. Для кожного інженерно-геологічного району окремо побудовані математичні моделі шаруватого ґрунту та розраховано амплітудно-частотні характеристики.

В таблицях 6.15 - 6.17 наведено основні фізичні параметри ґрунтів, що складають верхню частину осадового ґрунтового розрізу інженерно-геологічних районів, виділених в межах території Южно-Українська АЕС

**Усереднена модель ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком ВП
«Южно-Українська АЕС», інженерно-геологічний район № 1**

Опис порід	V_p , м/с	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
Насипний ґрунт і ґрунтово-рослинний шар	400	200	1.69	2.5
Суглинки лессовидні	450	230	1.83	1.0
Глина	550	260	1.88	2.0
Глини корінні	550	260	1.88	1.7
Піски корінні	1000	300	1.90	3.0
Каоліни (суглинки)	1000	300	1.90	2.3
Дресвяний ґрунт і дресвянистий пісок	1200	350	2.00	1.5
Граніт	4000	2000	2.60	-

Рівень ґрунтових вод - 3,5 м.

**Усереднена модель ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком ВП
«Южно-Українська АЕС», інженерно-геологічний район № 2**

Опис порід	V_p , м/с	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
Насипний ґрунт і ґрунтово-рослинний шар	400	200	1.69	1.5
Суглинки лесовидні	450	230	1.83	1.0
Глина	550	260	1.88	2.0
Глини корінні	550	260	1.88	2.5
Дресвяний ґрунт і дресвянистий пісок	1200	350	2.00	1.5
Граніт	4000	2000	2.60	-

Рівень ґрунтових вод - 3,5 м.

**Усереднена модель ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком ВП
«Южно-Українська АЕС», інженерно-геологічний район № 3**

Опис порід	V_p , м/с	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
Ґрунтово-рослинний шар	400	200	1.69	4.0
Суглинки лесовидні	450	230	1.83	1.3
Глини корінні	1000	300	1.90	1.7
Піски корінні	1000	300	1.90	1.0
Каоліни (суглинки)	1000	300	1.90	7.0
Дресвяний ґрунт і дресвянистий пісок	1200	350	2.00	1.5
Граніт	4000	2000	2.60	-

Рівень ґрунтових вод - 3,5 м.

Аналіз сейсмічної реакції моделей ґрунтової товщі території розміщення основних споруд ВП «Южно-Українська АЕС» проведено з використанням програмного комплексу ProShake [Proshake, 1996], розробленого для одномірного моделювання відгуку верхньої частини ґрунтового розрізу на сейсмічні впливи різної інтенсивності. Використано метод еквівалентного лінійного аналізу реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи [Kramer, 1996]. Поведінка кожного шару ґрунтової моделі при розрахунках задавалася моделлю Кельвіна – Фойгта (в'язко-пружною). Кожний шар ґрунтової моделі характеризувався такими параметрами, як: потужність шару, швидкості поперечних хвиль, максимальним модулем зсуву, густиною та нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від амплітуди деформації зсуву. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву дозволяють врахувати нелінійну поведінку ґрунтів під час землетрусу.

На рис. 6.14 представлено графіки зміни максимального коефіцієнта поглинання з глибиною при сейсмічних впливах різної величини в моделях шаруватого ґрунту 3 інженерно-геологічних районів в межах території ВП «Южно-Українська АЕС» .

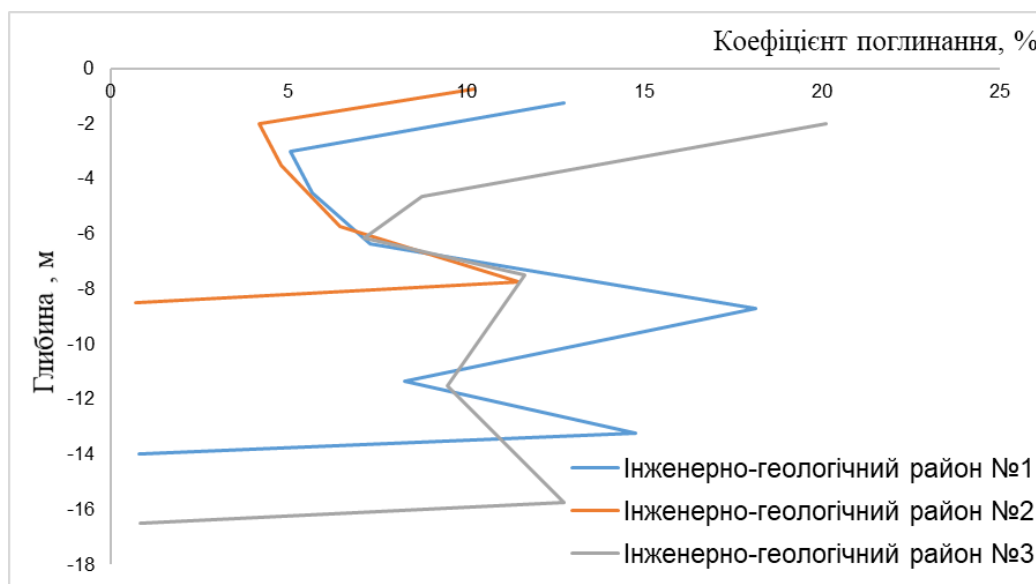


Рис. 6.14 Зміна з глибиною коефіцієнта поглинання при зондуванні моделей інженерно-геологічних районів № 1-3 території ВП «Южно-Українська АЕС»

Рис. 6.14 демонструє, що найбільших змін з глибиною зазнавали максимальні коефіцієнти поглинання інженерно-геологічних районів № 1 і № 3, тобто в цих моделях ґрунтові шари в більшій мірі проявляли зміну властивостей.

На рис. 6.15 представлено графіки зміни з глибиною пікової зсувної деформації при сейсмічних впливах різної величини в моделях ґрунтового середовища трьох досліджуваних інженерно-геологічних районів в межах території ВП «Южно-Українська АЕС» .

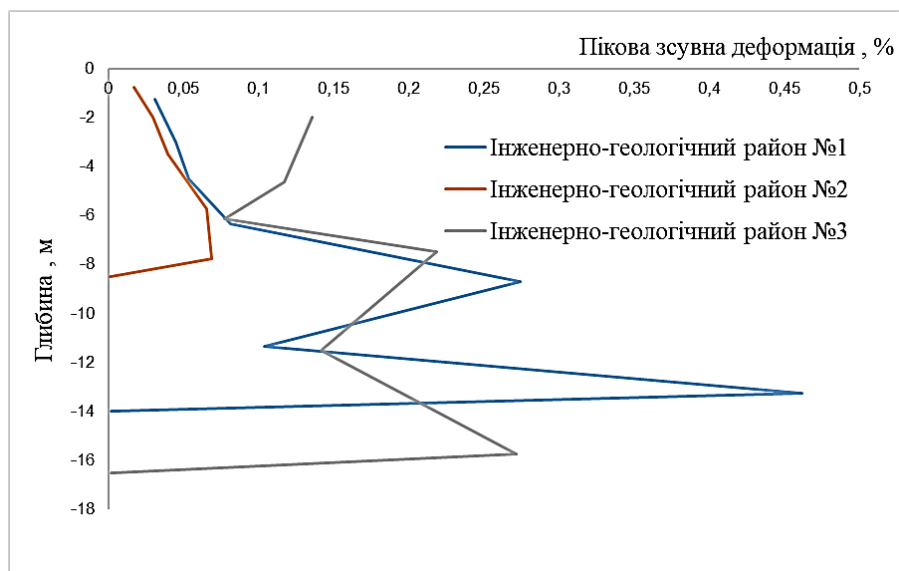


Рис. 6.15 Зміна пікової зсувної деформації з глибиною при сейсмічному зондуванні моделей інженерно-геологічних районів №1-3 території ВП «Южно-Української АЕС».

Графіки, представлені на рис. 6.15 показують, що найбільшій піковій деформації $PSS=0,46\%$ можуть зазнати ґрунти дресвяний ґрунт і дресвянистий пісок, які містяться в моделі інженерно-геологічного району № 1.

На рис. 6.16 представлено розраховані частотні характеристики моделей ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком ВП «Южно-Українська АЕС»

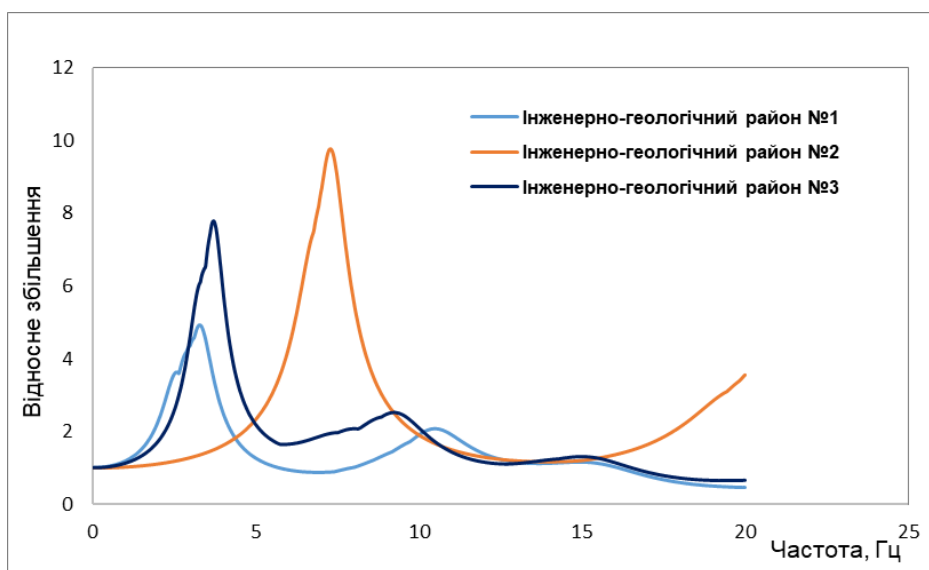


Рис. 6.16. Частотні характеристики інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 території розміщення основних споруд ВП «Южно-Українська АЕС»

Із результатів, представлених на рис. 6.16, видно, що частотна характеристика ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №1 Южно-Української АЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення сейсмічних коливань від 2,06 до 4,0 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 4,93. У зазначеному частотному діапазоні спостерігається один чіткий максимум на частоті 3,26 Гц. АЧХ ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №2 характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення сейсмічних коливань від 6,14 до 8,14 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 9,76. У зазначеному частотному діапазоні є один чіткий максимум на частоті 7,26 Гц. АЧХ ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №3 характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення сейсмічних коливань від 2,82 до 4,3 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 7,79. У зазначеному частотному діапазоні є один чіткий максимум на частоті 3,68 Гц. Порівнюючи частотні характеристики ґрунтової товщі трьох зон, виділених в межах території Южно-Української АЕС, можна побачити, що інженерно-геологічний район №1 характеризується більш низькими частотами власних коливань в порівнянні з районами №2 і №3 [Semenova, Kendzera, 2020b].

Аналізуючи розраховані частотні характеристики, можна побачити, що вони відрізняються в залежності від ґрунтових умов кожної зони. Підсилення ґрунтами сейсмічних хвиль в інженерно-геологічному районі №2 більше, ніж в інженерно-геологічному районі №1 і №3. Це явище можна пояснити тим, що товщина осадових відкладів в розрізі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №2 є найменшою [Kendzera, Rushchitsky, Semenova, 2021]. Потужність осадових відкладів району №2 становить 8,5 м, а району №1 - 14 м, а району №3 - 16,5 м. В розрізі ґрунтової товщі території Южно-Української АЕС глибина залягання корінних порід змінюється досить різко. Це призводить до зміщення резонансних максимумів в широкому діапазоні частот. Інженерно-геологічний район №1 відрізняється від району №3 більш низькими значеннями швидкостей поперечних сейсмічних хвиль, що пояснює більше поглинання

сейсмічної енергії і менше підсилення. Однак видно, що більш пухкі, насичені водою ґрунти мають більш низькочастотні коливання, ніж щільні глинисті або великоуламкові ґрунти.

Отримані частотні характеристики були використані при генеруванні розрахункових акселерограм, що імітують проектні землетруси із зони Вранча і з зон місцевого походження.

Для кожного інженерно-геологічного району №1, №2 та №3 території ВП «Южно-Українська АЕС» побудовано по 3 реалізації трикомпонентних розрахункових акселерограм для моделювання максимально розрахункового (МРЗ) і проектного землетрусу (ПЗ), відповідно, із зони Вранча на вільній поверхні ґрунту.

При їх генеруванні використовувалися різні комбінації теоретичних обвідних амплітудних спектрів розрахункових акселерограм, нормованих частотних характеристик середовища і фазових спектрів, отриманих з різних записів реальних підкорових землетрусів із зони Вранча. Основні параметри синтезованих акселерограм зведені в Таблицях 6.18–6.19 (для моделювання МРЗ і ПЗ, відповідно, із зони Вранча).

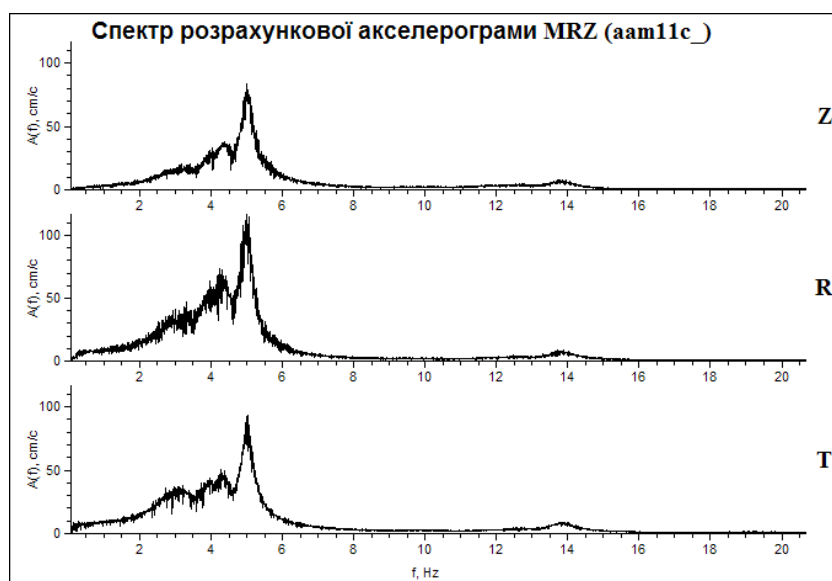


Рис. 6.17 Амплітудні спектри розрахункової акселерограми, моделюючої МРЗ із зони Вранча для інженерно-геологічного району №1 території ВП «Южно-Українська АЕС». Складові коливаль: R -

горизонтальна радіальна, T - горизонтальна тангенціальна, Z - вертикальна.

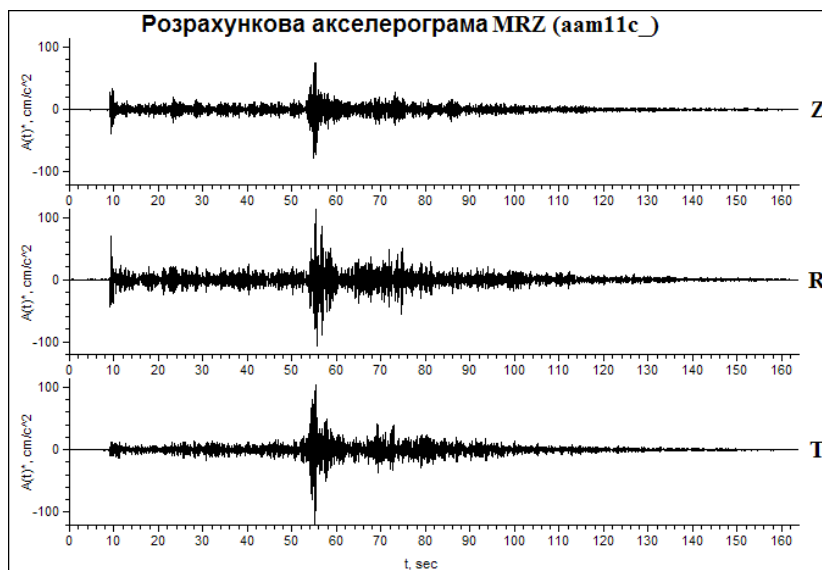


Рис. 6.18 Графік трикомпонентної розрахункової акселерограми для моделювання МРЗ із зони Вранча для інженерно-геологічного району №1 території майданчика ВП «Южно-Українська АЕС»

Таблиця 6.18

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання МРЗ із зони Вранча для інженерно-геологічного району №1 території Южно-Української АЕС

№ пп.	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонента коливань	Макс. прискорення, a_m , в cm/s^2	Переважаючі частоти, $Гц$		Тривалість коливань, $a \geq 0.9 a_m$ в сек.	Тривалість коливань, $a \geq 0.5 a_m$ в сек.	Кільк. відліків в акселерограмі	Дискретність акселерограм і Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	AAM10C_T	T	120.2	3.1	5.5	3.3	9.9	8192	0.0200 2
	AAM10C_R	R	111.8	2.7	5.5	3.3	14.9	8192	0.0200 2
	AAM10C_Z	Z	86.5	3.4	5.5	1.7	9.9	8192	0.0200 2

2	AAM11C T	T	120.5	2.7	5.5	1.7	5.0	16384	0.0100 0
	AAM11C R	R	113.3	2.7	5.5	1.7	6.6	16384	0.0100 0
	AAM11C Z	Z	78.3	3.7	5.5	1.7	3.3	16384	0.0100 0
3	AAM12C T	T	119.9	2.7	5.5	1.7	13.2	16384	0.0100 0
	AAM12C R	R	98.3	2.7	5.9	1.7	5.0	16384	0.0100 0
	AAM12C Z	Z	86.3	4.3	5.9	1.7	6.6	16384	0.0100 0

Таблиця 6.19

**Параметри розрахункових акселерограм для моделювання ПЗ із зони
Вранча для інженерно-геологічного району №1 території Южно-
Української АЕС**

№ пп	Назва файлу і складова вектора коливань	Комп онент а коли вань	Макс. приск оренн я, a_m , в $см/с^2$	Переважа ючі частоти, $Гц$		Трива -лість коли вань, $a \geq 0.9$ a_m в сек.	Трива -лість коли вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кільк. відлікі в в акселе рограм і	Дискре т-ність акселе рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	AAP10C T	T	53.8	1.8	5.5	3.3	16.5	16384	0.0100 0
	AAP10C R	R	44.7	2.9	5.5	3.3	19.9	16384	0.0100 0
	AAP10C Z	Z	40.4	4.0	5.5	1.7	5.0	16384	0.0100 0
2	AAP11C T	T	53.2	2.7	5.5	1.7	9.9	16384	0.0100 0
	AAP11C R	R	43.6	3.1	5.5	1.7	11.6	16384	0.0100 0
	AAP11C Z	Z	33.5	3.1	5.5	3.3	6.6	16384	0.0100 0
3	AAP12C T	T	52.7	2.7	5.5	1.7	9.9	16384	0.0100 0
	AAP12C R	R	42.7	3.4	5.5	1.7	6.6	16384	0.0100 0

	AAP12C_ Z	Z	32.1	3.7	5.5	3.3	9.9	16384	0.0100 0
--	--------------	---	------	-----	-----	-----	-----	-------	-------------

Для досліджуваного майданчика ВП «Южно-Українська АЕС» побудовано по 3 реалізації трикомпонентних розрахункових акселерограм для моделювання 7-ми бальних максимальних розрахункових землетрусів та 6-ти бальних проектних землетрусів із локальних потенційно сейсмоактивних зон. При їх генеруванні використовувалися різні комбінації теоретичних обвідних спектрів розрахункових акселерограм, нормованих частотних характеристик геологічного середовища під майданчиком і фазових спектрів різних записів близьких землетрусів, модифікованих з врахуванням умов майданчика. Приклад сновних параметрів розрахункових акселерограм для моделювання розрахункових і проектних землетрусів з близьких вогнищевих зон для інженерно-геологічного району №1 території Южно-Української АЕС, представлені в Таблицях 6.20 – 6.21.

Таблиця 6.20

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання МРЗ із місцевих потенційно сейсмоактивних зон для інженерно-геологічного району №1 території Южно-Української АЕС

№ пп	Назва файлу і складова вектора коливань	Комп онент а коли вань	Макс. приск оренн я, a_m , в $см/с^2$	Переважа ючі частоти, $Гц$		Трив а- лість коли вань, $a \geq 0.5$ $9 a_m$ в сек.	Трив аліст ь коли вань, $a \geq 0.5$ a_m в сек.	Кіль к. відлі ків в аксел е- рогра мі	Дискре т-ність акселе рограм и Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	AAM10C _T	T	120.3	12.0	15.4	0.4	0.4	4096	0.0100
	AAM10C _R	R	105.9	11.0	15.4	0.4	0.8	4096	0.0100
	AAM10C	Z	75.8	4.8	19.8	0.4	1.7	4096	0.0100

	_Z								
2	AAM11C_T	T	119.9	5.2	16.7	0.4	0.8	4096	0.0100
	AAM11C_R	R	101.9	4.0	16.7	0.4	0.8	4096	0.0100
	AAM11C_Z	Z	79.1	4.8	18.2	0.4	1.2	4096	0.0100
3	AAM12C_T	T	119.7	4.8	18.2	0.8	1.7	4096	0.0100
	AAM12C_R	R	98.2	11.0	21.5	0.4	1.2	4096	0.0100
	AAM12C_Z	Z	73.0	11.0	16.7	0.8	1.2	4096	0.0100

Таблиця 6.21

Параметри розрахункових акселерограм для моделювання ПЗ із місцевих потенційно сейсмоактивних зон для інженерно-геологічного району №1 території Южно-Української АЕС

№ пп.	Назва файлу і складова вектора коливань	Компонент а коливань	Макс. прискорення, a_m , в $см/с^2$	Переважаючі частоти, $Гц$		Тривалість коливань, $a \geq 0.9 a_m$ в сек.	Тривалість коливань, $a \geq 0.5 a_m$ в сек.	Кільк. відліків в акселерограмі	Дискретність акселерограм і Δt в сек
				min	max				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	AAP10C_T	T	53.4	10.1	16.7	0.8	0.8	4096	0.0100
	AAP10C_R	R	50.7	4.8	15.4	0.4	1.7	4096	0.0100
	AAP10C_Z	Z	34.2	5.2	18.2	0.8	0.8	4096	0.0100
2	AAP11C_T	T	53.1	4.0	19.8	0.4	0.8	4096	0.0100
	AAP11C_R	R	46.2	12	18.2	0.4	0.8	4096	0.0100
	AAP11C_Z	Z	39.8	10.1	18.2	0.8	0.8	4096	0.0100

	Z								
3	AAP12C_ T	T	52.8	4.8	15.4	0.4	0.8	4096	0.0100
	AAP12C_ R	R	49.1	4.4	16.7	0.4	1.2	4096	0.0100
	AAP12C_ Z	Z	36.4	11.0	15.4	0.4	0.4	4096	0.0100

6.4. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Запорізької АЕС

Запорізька атомна електростанція (ЗАЕС) являє собою головну уніфіковану атомну електростанцію країни з моноблочною компоновкою шести енергетичних ядерних блоків із серійною реакторною установкою ВВЕР – 1000, що є найбільшою в Європі.

У фізико-географічному відношенні територія району розміщення ЗАЕС знаходиться в степовій природній зоні. Незначні ділянки лісостепових ландшафтів примикають з півночі, однак, вони знаходяться за межами 150-км зони впливу АЕС.

Площадка ЗАЕС розташована в межах I надзаплавної тераси р. Дніпро. До початку планувальних робіт під будівництво АЕС рельєф ділянки мав горбистий вигляд, що утворився в результаті еолових процесів. Після планувальних робіт та будівництва 6-ти блоків ЗАЕС на березі Каховського водосховища (в зоні розташування колишнього старого вантажного порту) природний рельєф усієї ділянки був повністю порушений, відмітки його оновленої поверхні склали 17.3-23.0 м. Інженерно-геологічний розріз промайданчика АЕС вивчений до глибини 84,5 м (відмітки -67,56 м). Відмітка планування поверхні промайданчика ЗАЕС складає 22,0 м. На вивчену глибину площадка складена осадовими четвертинними алювіальними відкладами та утвореннями верхнього палеогену, що їх підстиляють. У підґрунті палеоген-четвертинних відкладів залягають породи кристалічного

фундаменту – демурінські граніти архейського віку та палеозой- мезозойські кори їх вивітрювання.

Кристалічні породи території Запорізької АЕС майже повсюдно перекриті осадовою товщею кайнозою. Будова і потужність товщі обумовлена як приналежністю її до різних геоструктур – УЩ і Причорноморської западини, так і рельєфом поверхні кристалічного фундаменту. На південь від північної межі району досліджень падіння поверхні відбувається вельми нерівномірно. На фоні загального пониження намічаються дві крупні западини, які мають вигляд розгалужених річкових долин – Томаківська і Базавлукська депресії (на територію району виходить тільки її крайова східна частина). Вони розділяються Нікопольським підняттям, з сходу Томаківська депресія обмежена Верхнетарасівським підняттям. На Лівобережжі відбувається досить різке занурення кристалічного фундаменту в бік Причорноморської западини. Відмітки поверхні кристалічних порід складають 100 м. Саме тут суцільно поширені відклади палеогенової і неогенової систем, загальна потужність яких сягає 150 м

Аналіз сейсмічної реакції ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Запорізької АЕС було проведено для інженерно-геологічних ділянок в місцях розміщення 1,3 та 6 реакторного відділення (РВ). В таблицях 6.22-6.24 наведено основні показники ґрунтів, що складають верхній осадовий шар інженерно-геологічних ділянок розташування РВ №1, №2 та №3.

Таблиця 6.22

Усереднена модель геологічного середовища інженерно-геологічного району РВ №1 території Запорізької АЕС

Опис порід	V_p , м/с	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
Насипний ґрунт –пісок мілкий, середньої щільності, вологий	400	190	1.62	4.7
Насипний ґрунт –пісок мілкий, середньої щільності,	820	280	1.94	1.8

насичений водою				
Піски мілкі, рихлі, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	770	280	1.92	2.2
Піски мілкі, середньої щільності, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	850	315	1.95	2.4
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	315	2.12	1.6
Суглинки коричнеувато-сірі, сірі, м'якопластичної консистенції	1000	380	2.02	0.3
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	420	2.12	6.9
Піски середні, світло-сірі, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	430	2.12	12.9
Глини зеленувато-сірі, сірі, опісчанені, напівтвердої консистенції	810	460	1.83	17.5
Піски пилуваті, світло-зелені, зеленувато-сірі, місцями слабоцементовані, з прошарками глин	870	460	1.86	14.7
Пісчаник середньозернистий, темно-зелений, кварцево-глауконітовий, слабоцементований	900	1000	1.84	4.0
Каолін світло-сірий, глиноподібний, озалізнений	840	1000	1.81	16.4
Граніт світло-сірий, мілко і середньозернистий, тріщинуватий	4000	2500	2.6	

Таблиця 6.23

Усереднена модель геологічного середовища інженерно-геологічного району РВ №3 території Запорізької АЕС

Опис порід	V_p , м/с	V_s , м/с	Густина ρ , г/см ³	Потужність шару, м.
------------	-------------	-------------	------------------------------------	---------------------

Насипний ґрунт –пісок мілкий, середньої щільності, вологий	400	190	1.62	4.7
Насипний ґрунт –пісок мілкий, середньої щільності, насичений водою	820	280	1.94	1.8
Піски мілкі, середньої щільності, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	850	315	1.95	4.5
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	315	2.12	1.0
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	420	2.12	5.0
Піски середні, світло-сірі, жовтувато-сірі, щільні, вологі, водонасичені	1425	430	2.12	10.0
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	430	2.12	5.5
Глини зеленувато-сірі, сірі, опісчанені, напівтвердої консистенції	810	460	1.83	11.2
Пісчаник середньозернистий, темно-зелений, кварцево- глауконітовий	900	1000	1.84	24
Каолін світло-сірий, глиноподібний, озалізнений	840	1000	1.81	15.9
Граніт світло-сірий, мілко і середньозернистий, тріщинуватий	4000	2500	2.6	

Таблиця 6.24

Усереднена модель геологічного середовища Інженерно-геологічного району РВ №6 території Запорізької АЕС

Опис порід	V _p , м/с	V _s , м/с	Густина ρ, г/см ³	Потужність шару, м.
Насипний ґрунт –пісок мілкий, середньої щільності, вологий	400	190	1.62	4.7
Насипний ґрунт –пісок мілкий,	820	280	1.94	1.8

середньої щільності, насичений водою				
Піски мілкі, середньої щільності, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	850	315	1.95	1.2
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	315	2.12	6.3
Суглинки коричнеувато-сірі, сірі, м'якопластичної консистенції	1000	380	2.02	1.6
Піски мілкі, щільні, жовтувато-сірі, вологі, водонасичені	1425	420	2.12	8.9
Піски середні, світло-сірі, жовтувато-сірі, щільні, вологі, водонасичені	1425	430	2.12	5.9
Глини зеленувато-сірі, сірі, опісчанені, напівтвердої консистенції	810	460	1.83	14
Пісчаник середньозернистий, темно-зелений, кварцево- глауконітовий	900	1000	1.84	6.0
Граніт світло-сірий, мілко і середньозернистий, тріщинуватий	4000	2500	2.6	

Аналіз сейсмічної реакції моделей ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Запорізької АЕС проводилися з використанням програмного комплексу ProShake [ProShake..., 1996; Schnabel P.B. et. al. 1972], розробленого для одномірного моделювання відгуку верхньої частини розрізу геологічного середовища на сейсмічні впливи. АЧХ розраховано для трьох моделей ґрунтового середовища інженерно-геологічних районів PO1, PO3 та PO6. Вихідні дані для побудови АЧХ були взяті з Таблиць 6.22 – 6.24 та бази даних деформаційних характеристик ґрунтів (залежності модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації).

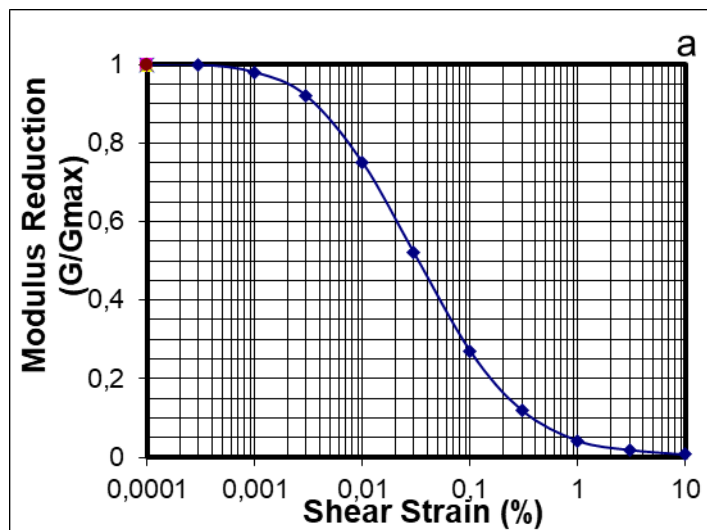
При побудові АЧХ моделей геологічного середовища інженерно-геологічних районів PO1, PO3 та PO6 території розміщення основних споруд

Запорізької АЕС використовувався метод еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

Еквівалентне лінійне моделювання було розроблено Айдріссом, Сідом, Шнайбелем та ін. [Idriss, Seed, 1968; Schnabel et al., 1972]. Це один з перших розроблених способів моделювання, який дозволяє враховувати нелінійні властивості ґрунтів. Програми еквівалентного лінійного моделювання базуються на отриманому Канаї [Kanai, 1952] розв'язку задачі про розповсюдження сейсмічних коливань в горизонтально-шаруватій ґрунтовій товщі.

Поведінка кожного шару ґрунтової моделі при розрахунках задавалася моделлю Кельвіна – Фойгта (в'язко-пружною). Кожний шар ґрунтової моделі характеризувався такими параметрами, як: потужність шару, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, густиною, нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від амплітуди зсувної деформації. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву дозволяє врахувати нелінійну поведінку ґрунтів під час землетрусу.

На рис. 6.18 представлено приклад моделі залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву для прошарку глини зеленувато-сірої, який присутній у всіх трьох моделях середовища інженерно-геологічних районів РО1, РО3 та РО6.



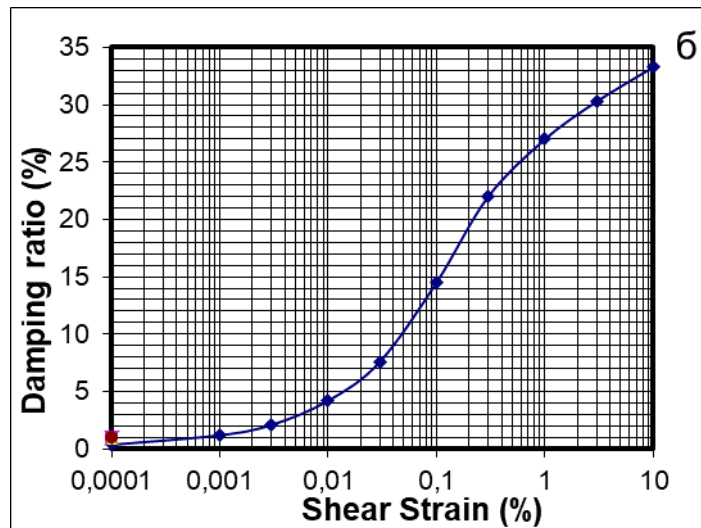


Рис. 6.18 Моделі залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву для шару глини зеленувато-сірої, який присутній у всіх трьох моделях середовища інженерно-геологічних районів РО1, РО3 та РО6.

На рис. 6.18 приведено розраховані АЧХ методом еквівалентного лінійного моделювання для моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів РО1, РО3 та РО6 території розміщення основних споруд Запорізької АЕС.

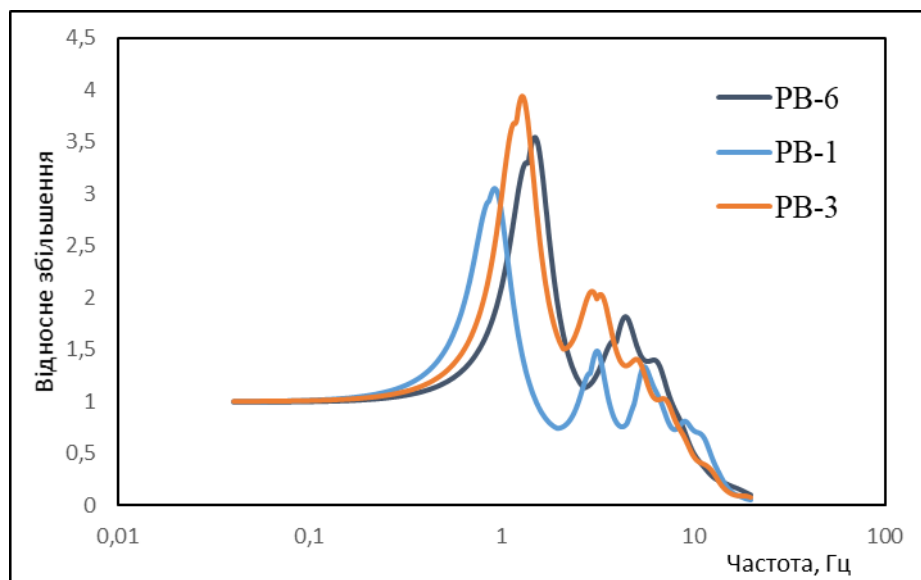


Рис. 6.20 Частотна характеристика моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів РО1, РО3 та РО6 в межах території розміщення основних споруд Запорізької АЕС

АЧХ розраховано для Т-складової коливаль, у випадку падіння поперечної хвилі знизу на підшву півпростору під досліджуваним майданчиком для інженерно-геологічних районів РО1, РО3 та РО6 в межах території розміщення основних споруд Запорізької АЕС.

АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району РО1 території розміщення основних споруд Запорізької АЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливаль локальними ґрунтовими умовами від 0,4 до 6,04 Гц. Найбільші підсилення коливаль локальними ґрунтовими умовами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 0,6 до 1,18 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливаль 2,97.

АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району РО3 території розміщення основних споруд Запорізької АЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливаль локальними ґрунтовими умовами від 0,54 до 5,36 Гц. Найбільші підсилення коливаль локальними ґрунтовими умовами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 0,82 до 1,78 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливаль 3,92.

АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району РО6 території розміщення основних споруд Запорізької АЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливаль локальними ґрунтовими умовами від 0,58 до 5,84 Гц. Найбільші підсилення коливаль локальними ґрунтовими умовами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 0,74 до 1,86 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливаль 3,54.

Аналіз АЧХ представлених на рис. 6.20 демонструє, що частотний діапазон можливого резонансного підсилення сейсмічних коливаль моделі району РО6 знаходиться в діапазоні вищих частот ніж в випадку районів РО1 та РО3. Цей факт пов'язаний з тим, що потужність осадових відкладів в

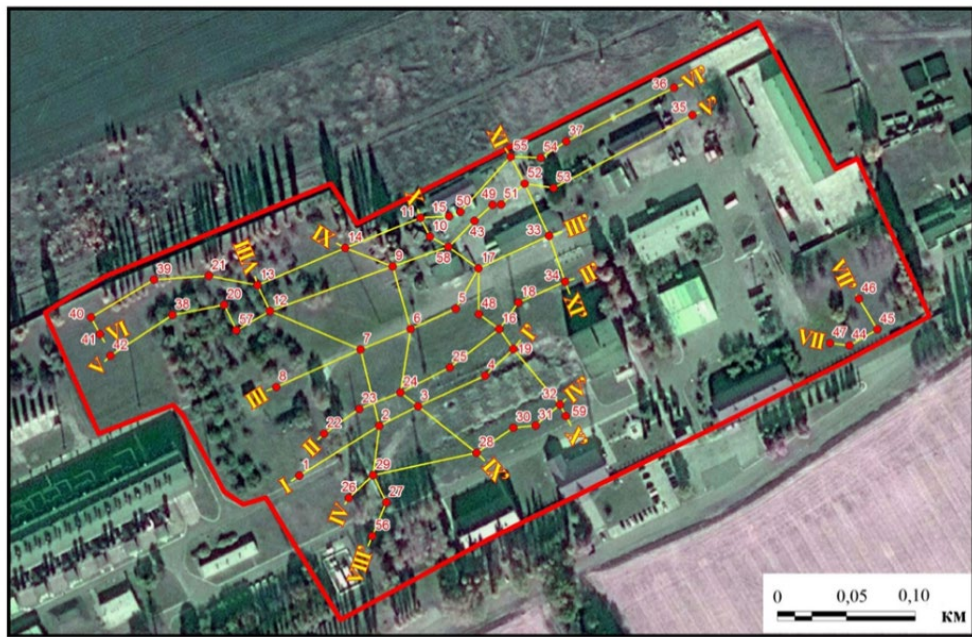
інженерно-геологічному районі РО6 майже в два рази менша, ніж в моделях інженерно-геологічних районів РО1 та РО3.

6.5. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території компресорної станції «Яготин»

Досліджуваний майданчик компресорної станції «Яготин» розташований за адресою: Київська область, Яготинський район, с. Ничипорівка, вул. Богдана Хмельницького, будинок 40/5.

Майданчик компресорної станції «Яготин» характеризується рівнинним рельєфом і розташована в лівобережній частині долини річки Дніпро. В інженерно-геологічному відношенні досліджуваний майданчик знаходиться в межах Дніпровсько-Донецької западини. Верхня частина геологічного розрізу представлена відкладеннями еолового та гляціального генезису. Переважно це лесові суглинки, які перекривають моренні суглинки. Ґрунтові води залягають на глибині 7-12 м. Товщина осадового шару до корінної породи майже 900м.

В межах ділянки реконструкції компресорної станції «Яготин», під час сейсмічного мікрорайонування було виділено 1 інженерно-геологічний район. Тому і усереднена модель геологічного середовища під майданчиком будувалася одна компресорної станції «Яготин». На рис. 6.21 представлено схему розміщення свердловин і інженерно-геологічних розрізів майданчика, дані яких були використані при побудові розрахункової сейсмогеологічної моделі.



● 7 Інженерно-геологічні свердловини, пробурені ТОВ «Геогазцентр»
 III—IV Інженерно-геологічні розрізи та їх номери.
 □ Межі майданчика компресорної станції «Яготин»

Рис. 6.21 Схема розміщення свердловин і інженерно-геологічних розрізів майданчика компресорної станції «Яготин» в межах однієї інженерно-геологічної ділянки.

Розрахункова сейсмогеологічна модель ґрунтового середовища території під майданчиком компресорної станції «Яготин» побудована як горизонтально-шарувата і вертикально-неоднорідна.

**Усереднена модель ґрунтової товщі території компресорної станції
«Яготин»**

Літологічний склад	Інтервал глибин Н, м	Швидкість сейсмічних хвиль		Густина порід ρ , г/см ³
		Поздовжньої V_p , м/сек	Попереочної V_s , м/сек	
Насипний ґрунт. Суглинок легкий, твердий та напівтвердий	0,0 – 6,0	299	249	1,85
Суглинок лесовидний, легкий, м'якопластичний	6,0 – 12,5	431	364	1,95
Суглинок легкий, тугопластичний, з включенням гравію та з перешаруванням супіску та піску	12,5 – 55,0	556	450	2,12
Мергель щільний, з прошарками мергельних глин	55,2-85,0	1600	640	2,0
Пісок, пісковик з прошарками глин та крейдоподібного мергелю	85 – 210	2100	900	2,0
Глина щільна, аргілітоподібна з прошарками пісковиків.	210 - 373	2600	1400	2,4
Пісчаники, аргілітоподібні глини	373 – 896	3600	1600	2,6
Гнейс біотитовий, граніт-біотитовий	896 - ∞	5000	2800	2,9

На рис. 6.22 представлена швидкісна модель розрізу ґрунтової товщі під досліджуваним майданчиком глибиною до верхньої межі залягання кристалічного фундаменту. З рис. 6.22 видно, що швидкісна модель характеризується досить низькими значеннями швидкості зсувної хвилі. Особливо низькі значення (до 500 м / с) в верхньому 50 метровому шарі.

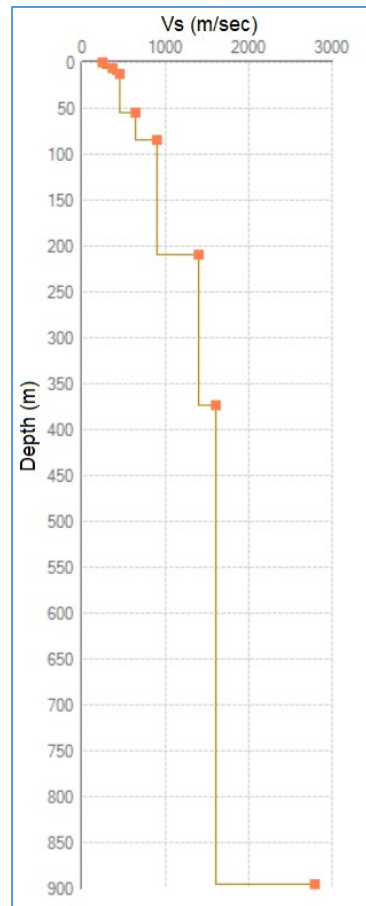


Рис.6.22 Швидкісна модель розрізу ґрунтової товщі до корінної породи під майданчиком компресорної станції Яготин

Аналіз сейсмічної реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи виконано з застосуванням еквівалентної лінійної моделі з використанням програмного забезпечення ProShake [ProShake..., 1998].

Поведінка кожного шару сейсмоґрунтової моделі при розрахунках апроксимувалася моделлю Кельвіна - Фойгта (в'язко-пружною). Кожен шар сейсмоґрунтової моделі характеризувався такими параметрами, як: потужність

шару, швидкості поздовжніх і поперечних хвиль, щільності, нелінійними залежностями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від амплітуди сдвигової деформації дозволяють врахувати нелінійне деформування ґрунтів при сейсмічній дії.

На рис. 6.23 представлена амплітудно-частотна характеристика моделі ґрунтової товщі під майданчиком компресорної станції «Яготин»

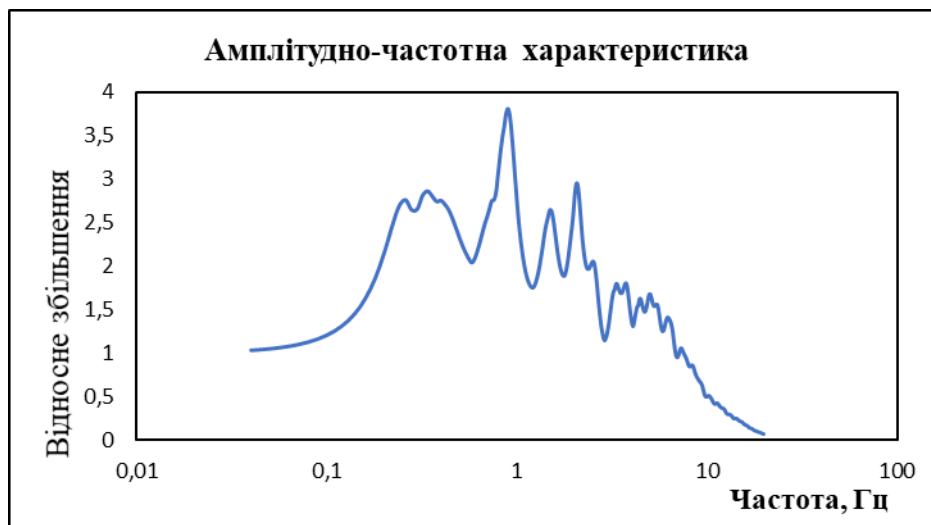


Рис. 6.23 Частотна характеристика моделі ґрунтової товщі під майданчиком компресорної станції «Яготин»

Аналіз частотної характеристики, представленої на рис. 6.23 показав, що сейсмічні коливання можуть посилюватися ґрунтами під досліджуваною майданчиком в досить низькому діапазоні частот 0,18-2,66 Гц. Найбільші посилення передбачаються в районі 1 Гц. Частотна характеристика має широкий діапазон резонансного посилення сейсмічних коливань ґрунтами [Semenova, Kendzera, 2020; Kendzera, Semenova, 2020b]. Це пов'язано з великою товщиною осадового шару близько 900м.

Врахування підсилення сейсмічних коливань в діапазоні низьких частот необхідний для сейсмостійкого проектування висотних і протяжних споруд, оскільки вони характеризуються низькими власними частотами коливань. Такі

об'єкти, розташовані на території України, можуть бути пошкоджені при сейсмічних коливаннях сильних підкорових землетрусів із зони Вранча. Сейсмічні впливи від цих землетрусів характеризуються низькочастотними коливаннями і поширюються на великі відстані без значного згасання, що може привести до небезпечних резонансних ефектів.

6.6. Сейсмічна реакція ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Канівської ГЕС

В межах ділянки території розміщення основних споруд Канівської ГЕС під час сейсмічного мікрорайонування було виділено 2 інженерно-геологічні райони №1, №2. Для інженерно-геологічних районів №1, №2 були побудовано усереднені моделі геологічного середовища.

Для оцінки впливу товщі осадових порід використовувалися одномірні (горизонтально шаруваті моделі середовища), що цілком допустимо в умовах близько горизонтального залягання основних геологічних елементів осадової товщі.

Параметри усередненої моделі геологічного середовища для інженерно-геологічного району №1 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС наведені в Таблиці 6.26.

Таблиця 6.26

Усереднена модель геологічного середовища інженерно-геологічного району №1 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС

Літологічний склад	Інтервал глибин в м.	Густина порід ρ_d (г/см ³)	Швидкість сейсмічних хвиль	
			V_p (м/с)	V_s (м/с)
Насипний ґрунт – пісок, супісок з включенням обломків пісковика	0 – 8	1,5	180	150
Пісок дрібний і середньої крупності, з прошарками супіску і уламками	8 – 30	1,6	360 – 380	250 – 300

пісковуку. Четвертинні льодовикового походження відклади				
Палеогенові піски, дрібні з прошарками середньозернистих, з уламками кварциту (P)	30 – 58	1,62	380 – 420	320 – 350
Піски різнозернисті з включенням стяжін кременистого пісковуку від 20 до 40 % (K)	58 – 85	1,68	400 – 520	360 – 380
Глини піщанисті, алевролітові, невиразно шаруваті, щільні (J ₂)	85-220	1,85	1200 – 1600	1000 – 1200
Строкати і червоні глини, піски, пісковуки	220-275	1,9	2600	910
Піски, пісковуки, глини	275-375	1,94	2800	1400
Гнейси біотитово-плагіоклазові	375 - ∞	2,6	5000	2600

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

Параметри усередненої моделі геологічного середовища для інженерно-геологічного району №2, виділеного в межах території розміщення основних споруд Канівської ГЕС наведені в Таблиці 6.27.

Таблиці 6.27

Усереднена модель геологічного середовища інженерно-геологічного району № 2 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС

Літологічний склад	Інтервал глибин в м.	Густина порід ρ_d (г/см ³)	Швидкість сейсмічних хвиль	
			V_p (м/с)	V_s (м/с)
Піски техногенні (намивні) середньої крупності, середньої щільності, з прошарками і лінзами пухких-розуцільнених зон	0 – 8,0	1,56	280 – 350	200 – 250
Піски алювіальні різнозернисті, середньої щільності вище РГВ (Q)	8,0 – 12,5	1,73	350 – 400	300 – 350
Піски різнозернисті кварцеві, місцями глинисті, середньої щільності, водонасичені (Q)	12,5 – 24,0	1.7	1200 – 1300	350 – 400

Піски різнозернисті місцями гравелісті з галькою (флювіогляціальні), лінзи – глина суглинків (Q)	24 – 220	1,73	1200 – 1300	400 – 450
Строкати і червоні глини, піски, пісковики	220-275	1,9	2600	910
Піски, пісковики, глини	275-375	1,94	2800	1400
Гнейси біотитово-плагіоклазові	375 - ∞	2,6	5000	2600

Примітка: * позначені параметри, взяті за площами регіону.

Аналіз сейсмічної реакції моделей ґрунтової товщі території розміщення основних споруд Канівської ГЕС проводився з використанням програмного комплексу ProShake [ProShake..., 1998], розробленого для одномірного моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні впливи. Для врахування особливостей нелінійної непружної поведінки ґрунтів в даній роботі використовувалася еквівалентна лінійна модель. Поведінка кожного шару ґрунтової моделі при розрахунках задавалася моделлю Кельвіна – Фойгта (в'язко-пружною). Еквівалентна лінійна модель заснована на припущенні, що модуль зсуву і коефіцієнт поглинання є функціями деформації зсуву. Залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від зсувної деформації для кожного шару моделей середовища, обирались на підставі моделей, отриманих для різних порід [Seed, Idriss, 1970; Ishibashi, Zhang, 1993; Vucetic, Dobry, 1991 та ін.]. Використання при розрахунках залежностей модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від деформації зсуву дозволяють врахувати нелінійну поведінку ґрунтів під час землетрусу.

На рис.6.24 представлено приклад моделі залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву для шару моделей середовища інженерно-геологічного району №1 та №2 з інтервалами глибин 220-275м складеного строкатими і червоними глинами, з включеннями піску, пісковіку.

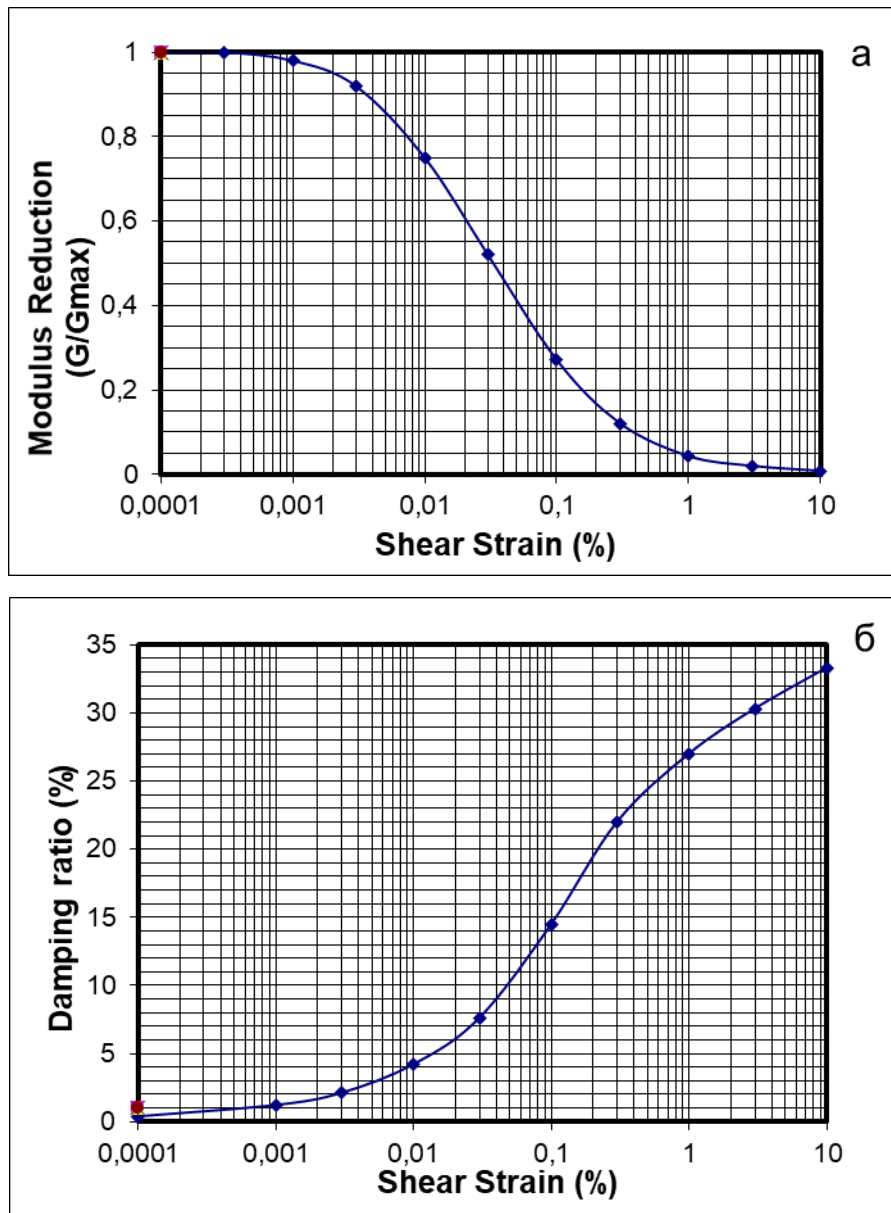


Рис. 6.24 Моделі залежності модуля зсуву (а) і коефіцієнта поглинання (б) від деформації зсуву для шару моделей середовища інженерно-геологічного району №1 та №2 з інтервалами глибин 220-275м складеного строкатими і червоними глинами, з включеннями піску, пісковуку

Частотні характеристики будувались для двох моделей ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №1 та №2. Вихідні дані для побудови АЧХ були взяті з таблиць 6.5 - 6.26. та бази даних деформаційних характеристик ґрунтів (залежності модуля зсуву та коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації).

На рис. 6.25 приведено АЧХ для моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1 та №2.

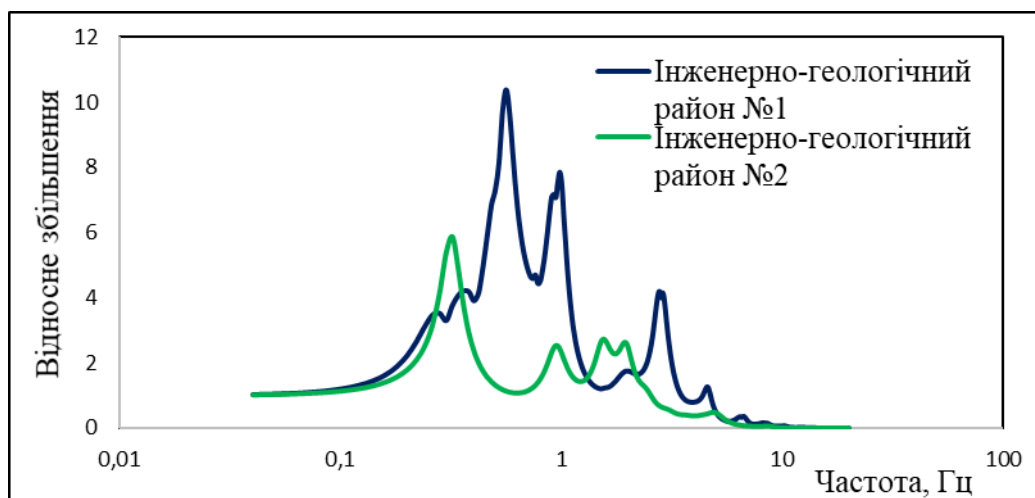


Рис. 6.25 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1 і №2 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС

Частотна характеристика ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №1 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,26 до 3,02 Гц. Найбільші підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 0,44 до 1,06 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливань 10,37.

Частотна характеристика ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №2 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 0,22 до 2,08 Гц. Найбільші підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись в частотному діапазоні від 0,26 до 0,38 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливань 5,86.

На рис. 6.26 представлено максимальні амплітудні спектри Фур'є прискорень коливань ґрунту на поверхні двох інженерно-геологічних районів території Канівської ГЕС.

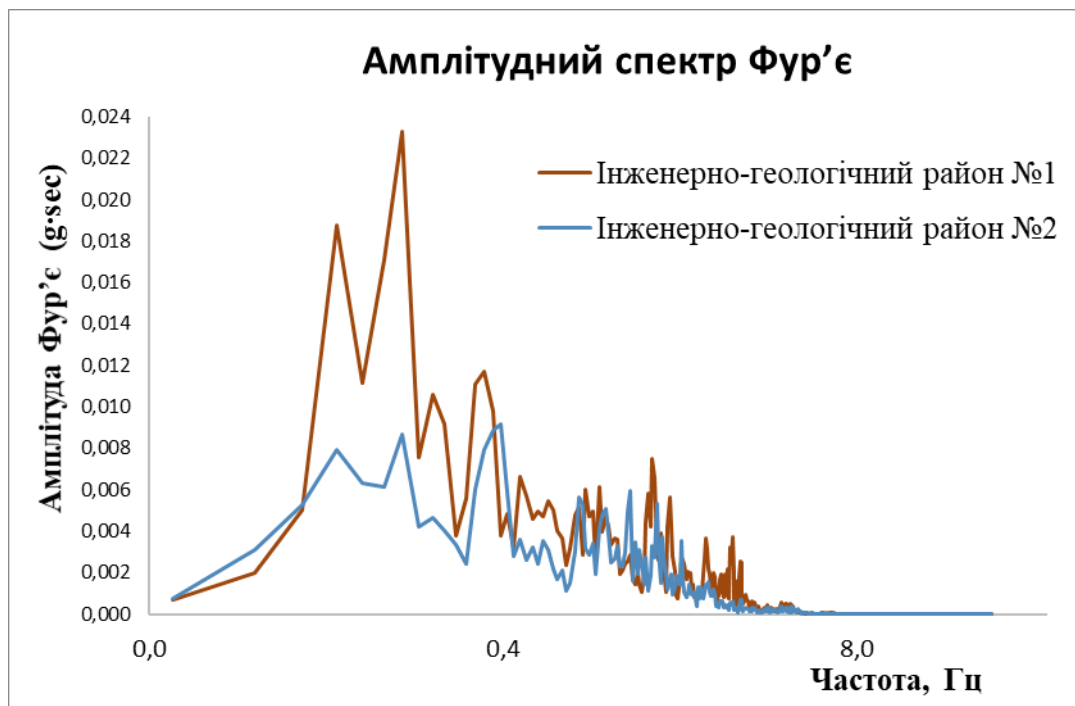


Рис. 6.26 Максимальні амплітудні спектри Фур'є прискорень коливань ґрунту інженерно-геологічних районів №1 і №2 території Канівської ГЕС.

Амплітудні спектри Фур'є, представлені на рис. 6.26 демонструють різницю прояву землетрусів на вільній поверхні двох інженерно-геологічних районів в межах території Канівської ГЕС [Semenova, 2021e; Semenova, 2021f]. Максимальні амплітудні значення спектра Фур'є коливань ґрунту на поверхні інженерно-геологічного району №1 складають 0,023g і в 2,5 рази вищі ніж відповідні значення інженерно-геологічного району №2. Таким чином, можна стверджувати, що інженерно-геологічний район №1 є більш небезпечним в сейсмічному відношенні порівняно з інженерно-геологічним районом №2.

На рис. 6.27 представлено графіки зміни пікової зсувної деформації з глибиною в ґрунтових розрізах інженерно-геологічних районів №1 і №2 території Канівської ГЕС.

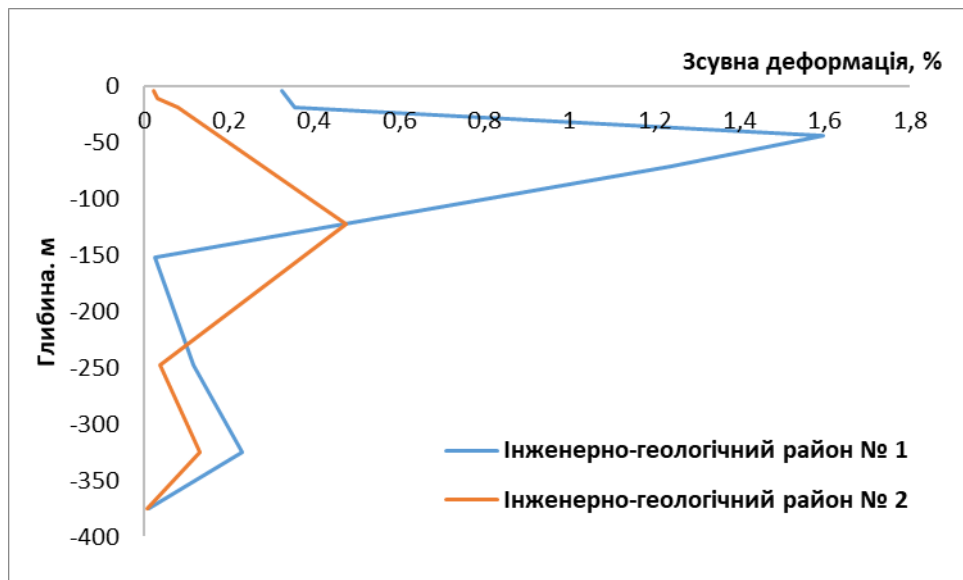


Рис. 6.27 Графіки зміни пікової зсувної деформації з глибиною в ґрунтових розрізах інженерно-геологічних районів №1 і №2 території Канівської ГЕС

З рис. 6.27 видно, що вищі значення пікової зсувної деформації спостерігаються в ґрунтовому розрізі інженерно-геологічного району №1, які стрімко почали зростати з глибини 150м і максимальних значень набули на відмітці глибини 44м. Це явище можна пояснити тим, що в моделі ґрунтового розрізу інженерно-геологічної ділянки №1 є різка границя акустичної жорсткості між шарами, що викликало підсилення амплітуди сейсмічної хвилі і відповідно деформації «слабкого» шару. Модель ґрунтового розрізу інженерно-геологічної ділянки №1 від корінної породи до вільної поверхні характеризується більш плавним зменшенням значень швидкості поперечної хвилі і густини ґрунтового шару.

На рис. 6.28 представлено розраховані графіки зміни коефіцієнта поглинання з глибиною в ґрунтових розрізах інженерно-геологічних районів №1 і №2 території Канівської ГЕС.

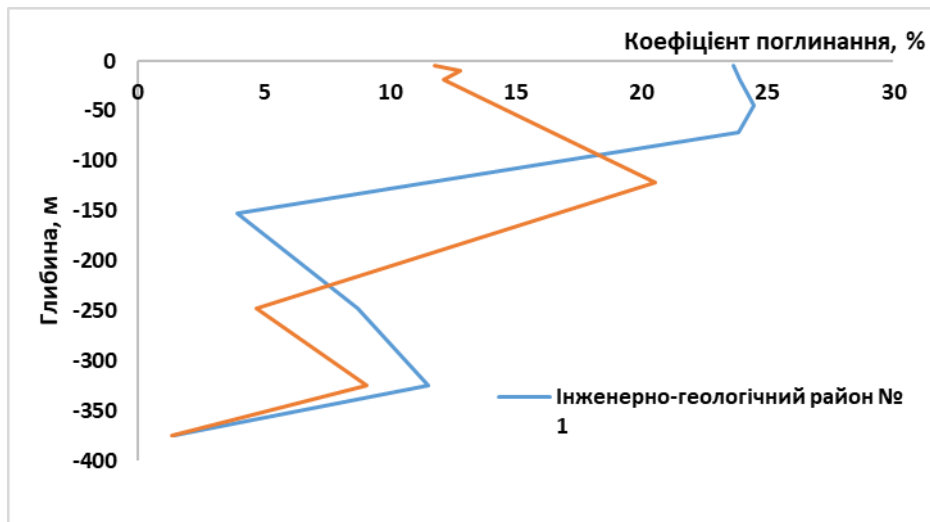


Рис. 6.28 Графіки зміни коефіцієнта поглинання з глибиною в ґрунтових розрізах інженерно-геологічних районів №1 і №2 території Канівської ГЕС

З рис. 6.28 видно, що в ґрунтовому розрізі інженерно-геологічного району №1 спостерігається різке збільшення коефіцієнта поглинання з відмітки 150 м до 44 м. Співставляючи графіки на рис. 6.27 і рис. 6.28 відслідковується картина паралельності зростання з глибиною коефіцієнта поглинання і зсувної деформації, однак після набуття пікового значення – залишковий процес не супроводжується паралельністю зміни вказаних параметрів.

Висновки до розділу 6

В розділі представлено результати аналізу сейсмічної реакції ґрунтової основи відповідальних споруд Ташлицької гідро-акумуляуючої станції, Канівської ГЕС, Запорізької АЕС, Южно-Української АЕС, Середньодніпровської ГЕС та компресорної станції «Яготин», розташованих на території України. Розрахунки проведено за розвинутою методикою, яка, згідно вимоги нормативного документу МАГАТЕ, враховує нелінійне деформування ґрунтів при сейсмічних навантаженнях. Методика ґрунтується на застосуванні аналітично-емпіричного підходу до визначення спектральних характеристик коливань ґрунтів з врахуванням їх нелінійної реакції. Цим вона є точнішою (більш досконалою), у порівнянні з підходами рекомендованими для практичного використання чинними в Україні нормативними документами

ДБН В.1.1-12:2014 [Будівництво..., 2014]. Покращена методика дозволяє точніше визначати кількісні параметри сейсмічної небезпеки, необхідні для сейсмостійкого проектування та будівництва.

Розраховано частотні характеристики ґрунтових товщ, амплітудні спектри Фурє, спектри реакції з 5% згасанням. Проведено результати динамічного аналізу зміни параметрів сейсмічного коливання та деформаційних характеристик з глибиною, а саме коефіцієнта поглинання, пікової деформації, пікового прискорення та ін. параметрів. Динамічний аналіз зміни показників сейсмічного коливання з глибиною дозволяє виявити сейсмічно слабкі шари в ґрунтовій товщі.

Отримані результати використано при визначенні критичних сейсмічних навантажень відповідальних споруд під час прогнозованих сейсмічних навантажень від місцевих землетрусів і землетрусів зони Вранча.

Перелік використаних джерел до Розділу 6

1. Ishibashi I., Zhang X. J. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found*, 33(1), 182—191.
2. Kendzera O., Rushchitsky J., Semenova Y. (2021). Rheological Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of the South Ukrainian Nuclear Power Plant. In: Bonali F.L., Pasquaré Mariotto F., Tsereteli N. (eds) *Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 365-373 https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_20.
3. Kendzera O., Semenova Yu. (2020b). Spectral properties of soils of the Yagotin compressor station site (Ukraine) // *Sciences of Europe*, 1(55), 26-30.
4. Kramer S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. N. J.: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672.

5. NS-G-2.13 «Оценка сейсмической опасности существующих ядерных установок». (2014). Руководство по безопасности. Серия норм по безопасности. МАГАТЭ, Вена
6. ProShake Ground Response Analysis Program, version 1.1. (1998). User's Manual, EduPro Civil Systems, Washington, USA, 54.
7. 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.
8. Seed H. B., Idriss I. M., (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report no. EERC70-10, EERC, Univ. of California, Berkeley
9. Semenova Yu. (2021b). Seismic soil response at the base of the Srednedniprovskaaya hydroelectric power plant // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 10(5), 160-163. DOI:10.15680/IJRSET.2021.1005002.
10. Semenova Yu. (2021e). The influence of near-surface soils on the enhancement of seismic movements in the problem of seismic protection of nuclear power plants // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 3(5), 321-324.
11. Semenova Yu. (2021f). Seismic response of two engineering-geological sites of the Kanevskaya pumped storage power plant territory. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 8(3), 232-237 <https://doi.org/10.32628/IJSRST1218359>.
12. Semenova Yu., Kendzera A. (2020a). Seismic site effects evaluation of the Yagotin compressor station (Ukraine) // Conference Proceedings, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020, 1 - 6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo091>.

13. Semenova Yu., Kendzera O. (2020b). Determination of site amplification in the South Ukrainian NPP // *Norwegian Journal of development of the International Science*, 1(46), 9-12
14. SSG-25, МАГАТЭ, Вена (2014). Серия норм МАГАТЭ по безопасности. «Периодическое рассмотрение безопасности атомных электростанций». Специальное руководство по безопасности. МАГАТЭ, Вена, 2014.
15. Vucetic M., Dobry R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.* 117, 89—107.
16. José M. (2015). *Carcione Wave fields in real media: wave propagation in anisotropic, anelastic, porous and electromagnetic media*. Third Edition. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 690 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18893-9>
17. Будівництво в сейсмічних районах України ДБН В.1.1-12:2014. (2014). Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 110 с.
18. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. (2018). Вплив осадової товщі на сейсмічні коливання на території Ташлицької гідроаккумуляційної електростанції. *Геодинаміка*, 1(24), 91—99. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.091>.
19. Кендзера О.В., Семенова Ю.В., Вербицький С.Т., Єгупов В.К., Лісовий Ю.В. (2019). Вплив локальних ґрунтових умов на сейсмічні коливання майданчика Ташлицької ГАЕС. *Наука та будівництво*, 2, 11-19 DOI: 10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65.
20. Рябенко В.А. (1974). Особенности тектоники докембрия Украинского щита: дис. на соиск. науч. степени д-ра геол.-мин. наук. – К.: ИГН АН УССР, 453 с.
21. Сафронов О.Н. (2003). Сеймотектонические условия и сейсмическая опасность платформенной части Украины. - Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геологических наук по специальности 04.00.22 – геофизика. – Киев: Фонды ИГФ НАН Украины, 16 с.

22. Ломнитц Ц., Розенблют Э. (1981). Сейсмический риск и инженерные решения. Москва: Недра, 375 с.
23. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. (1995). Ред. Уломов В.И., Москва: ОИФЗ РАН, 1, 2-3, 490 с.
24. Семенова Ю. (2021в). Оцінка частотних коливань ґрунтової товщі території Середньодніпровської ГЕС при сейсмічних навантаженнях // Colloquium-journal, 13(100), 28-32 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-13100-28-32.
25. Семенова Ю. (2021г). Сейсмічна реакція ґрунтової товщі в основі Ташлицької гідроакумуючої станції на динамічні навантаження // Colloquium-journal, 14(101), 14-19 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-14101-14-19.
26. Палієнко В.П., Матошко А.В., Барщевський М.Є., Спиця Р.О. та ін. (2005). Сучасна динаміка рельєфу України. Київ: Наук. думка, 267 с.
27. Харитонов О.М., Костюк О.П., Кутас В.В., Пронишин Р.С., Руденская И.М. (1996). Сейсмичность территории Украины. - Геофиз. журн., 18, 1, 3-15

ВИСНОВКИ

Дисертація є самостійною закінченою роботою, яка вирішує проблему сейсмічного районування територій з недостатнім забезпеченням даними інструментальних спостережень у фізичних параметрах прогнозованих коливань ґрунту. В роботі розглянуто теоретичні основи та удосконалення методики сейсмічного районування територій крупних агломерацій та промислових об'єктів на території України у фізичних параметрах коливань ґрунтів, необхідних для ефективного використання методів розрахунку сейсмічних навантажень на будинки, споруди та окремі відповідальні конструкції. Удосконалена методика дозволяє перейти від використання ряду фізично некоректних умовностей та спрощень в методах розрахунку сейсмостійкості споруд до застосування більш обґрунтованих параметрів коливань ґрунтів в основі досліджуваного об'єкта.

При цьому отримано наступні наукові і практичні результати.

1. Розроблено алгоритм розв'язку задачі сейсмічного районування територій в амплітудних та спектральних параметрах прогнозованих коливань ґрунтів

2. Розроблено теоретичні і методичні основи переходу від використання сейсмічної інтенсивності землетрусів в балах і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями до фізичних параметрів прогнозованих коливань ґрунту через запропоновані в роботі поправочні ґрунтові коефіцієнти, які враховують фільтруючі властивості ґрунтової товщі і механізми перетворення сейсмічних хвиль в шаруватому ґрунті. Перехід необхідний для покращення і більш ефективного та обґрунтованого застосування методів розрахунку споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу. З застосуванням експериментального теоретичного моделювання сейсмічної реакції моделей шаруватого ґрунту віднесеного до однієї категорії за сейсмічними властивостями показано, що врахування потужності ґрунтових шарів та контрастності сейсмічних жорсткостей між ґрунтовими шарами

призводить до розбіжності частотної вибіркості підсилення сейсмічних коливань. В результаті зондування моделей одним і тим же сейсмічним впливом, амплітудні рівні отриманих спектрів реакції відрізняються в 2 рази. При використанні рекомендованого ДБН В.1.1-12:2014 переходу від категорії ґрунту до параметрів коливань ґрунту амплітудний рівень спектрів реакції буде однаковим. Таким чином, використання лише категорії ґрунту в коефіцієнтах для врахування нелінійного деформування ґрунту при інтенсивних сейсмічних коливаннях є недостатнім. Використання запропонованих ґрунтових коефіцієнтів вирішує цю проблему. Методику визначення поправочних ґрунтових коефіцієнтів реалізовано на прикладі території Києва.

3. З використанням чисельного моделювання досліджено вплив зміни окремих параметрів ґрунтової товщі (зокрема вологості, ущільнення наявного в розрізі піску та оголення ґрунтової товщі до корінної породи) на спектральні характеристики ґрунтової товщі. За результатами аналізу сейсмічної реакції ґрунтових шарів встановлено, що ущільнення піску призводить до зменшення ширини частотного діапазону підсилення коливань та перекачування енергії в більш високочастотну область, що вказує на покращення несучої здатності насипного піску як ґрунтової основи. Збільшення вологості, як глинистих так і піщаних ґрунтів, призводить до розширення спектральної області та перекачування енергії в більш низькочастотну область. Розширення спектральної області зі збільшенням вологості є більш чутливим для пісків порівняно з глинистими ґрунтами. Результати аналізу сейсмічної реакції моделей ґрунтової основи на прикладі території Ташлицької ГЕС показали, що умовне зняття осадового шару не передбачає зменшення величини сейсмічних ефектів при сейсмічних впливах, оскільки необхідно враховувати зміну спектрального складу відносно власних коливань закладених в конструктивних рішеннях.

4. Теоретично обґрунтовано та впроваджено в практику сейсмічного районування України методику побудови сейсмогеологічних моделей

таксонометричних ділянок, з врахуванням нелінійного деформування при сейсмічних навантаженнях.

5. Методом сейсмогеологічних аналогій виділено таксонометричні ділянки в межах Києва, визначено їх сейсмічні властивості та нелінійні характеристики (криві зменшення модуля зсуву та збільшення коефіцієнта поглинання від деформації зсуву). Побудовано математичні сейсмогеологічні моделі виділених таксонометричних ділянок.

6. Із застосуванням чисельного моделювання методом еквівалентно-лінійного аналізу сейсмічної реакції ґрунту визначено частотні характеристики таксонометричних ділянок Києва. Розраховано усереднену частотну характеристику ґрунтових умов території Києва з врахуванням нелінійного деформування ґрунтів при сейсмічних навантаженнях.

7. Виконано чисельний динамічний аналіз поширення сейсмічних коливань в сейсмогеологічних моделях та виділено сейсмічно слабкі шари в ґрунтових розрізах території Києва. Виділені ґрунти при певному розташуванні по глибині і певній потужності проявляються як сейсмічно слабкі прошарки з високими значеннями пікової зсувної деформації. У розрізах фрагмента Київ М-36-ХІІІ геологічної карти ДНВП "Геоінформ України" до таких ґрунтів віднесено моренні відклади та супісок в приповерхневому заляганні потужністю від 10 м; пісок алювіальний при потужності від 30 м. При менших потужностях у вказаних ґрунтах спостерігається різке збільшення коефіцієнта поглинання, проте без збільшення пікової зсувної деформації. Це вказує на те, що при меншій потужності вказаних ґрунтів, але при амплітуді сейсмічного впливу більшій ніж $0,06g$, можливо будуть спостерігатись піки зсувної деформації. З огляду на це, виділено ділянки на території Києва, в розрізах яких в приповерхневому заляганні містяться ґрунти здатні до нелінійних проявів більшою мірою, ніж на інших ділянках. Величина цього прояву буде прямо пропорційна величині падаючих сейсмічних коливань.

8. Побудовано карту розподілу коефіцієнта інтегрального підсилення сейсмічних коливань ґрунтами для території Києва. Коефіцієнти спектрального

підсилення запропоновано використовувати в якості поправочних ґрунтових коефіцієнтів в методах розрахунку будівель і споруд на аварійні сейсмічні навантаження. Поправочні ґрунтові коефіцієнти враховують контрастність зміни сейсмічної жорсткості на границях між шарами ґрунтової товщі та особливості нелінійного деформування кожного ґрунтового шару моделі. Використання для цілей сейсмічного захисту карти розподілу по території досліджуваного будівельного майданчика поправочних ґрунтових коефіцієнтів, замість традиційної карти СМР, побудованої за методом інженерно-сейсмологічних аналогій, виключає необхідність у подальшому робити штучні переходи від позасистемної сейсмічної інтенсивності до фізичних характеристик прогнозованих коливань ґрунтів. Ґрунтові коефіцієнти, які враховують інформацію про сейсмічні жорсткості шаруватої ґрунтової товщі, дають змогу перейти до принципово нового опису взаємозв'язку властивостей ґрунту і параметрів сейсмічних впливів з використанням безперервних (не дискретних) величин. При прогнозуванні величини сейсмічних впливів такий підхід рекомендується американськими і європейськими нормативними документами, в яких замість балів інтенсивності, сейсмічні впливи описуються фізичними параметрами сейсмічних коливань ґрунту, спектрами реакції або PGA .

9. Розраховано прогнозні (очікувані) амплітудні і спектральні параметри сейсмічних коливань шаруватого ґрунту таксонометричних ділянок Києва при прогнозованих сейсмічних впливах з максимальною амплітудою до 0,06g.

10. Побудовано карту сейсмічного зонування Києва в пікових прискореннях ґрунту PGA при прогнозованих сейсмічних впливах з максимальною амплітудою до 0,06g. Карту розподілу PGA рекомендовано використовувати в інженерних цілях додатково з розрахованими спектральними характеристиками кожної таксонометричної ділянки.

11. Для таксонометричних ділянок Києва розраховано спектри реакції з 5% згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами пронормованими по амплітуді до 0,06g. В результаті кількісної інтерпретації та

аналізу розрахованих спектрів реакції встановлено сильну пряму кореляцію між піковими значеннями спектрального прискорення PSA і площею підспектральної області та слабку зворотну між абсолютною шириною спектра і площею підспектральної області. Отриманий результат вказує на те, що порівнюючи сейсмічні показники таксонометричних ділянок території Києва в загальному випадку, більш інформативними є амплітудні параметри ніж ширина спектра. Проте, оцінити, яка з ділянок характеризується «гіршими» умовами з сейсмічної точки зору, можна лише для конкретного об'єкту. Враховуючи більш широкий частотний діапазон таксонометричних ділянок № 1-2, № 6-11, № 13, № 16 можна стверджувати що на цих ділянках, при розрахунках сейсмостійкості, виявиться більше сейсмічно вразливих об'єктів і конструкцій. Проте, спектральні прискорення вищі на ділянках № 3-5, № 14-15 з вузьким діапазоном спектрального підсилення, тому для об'єктів з близькими власними переважаючими періодами і згасаннями ці ділянки можуть виявитися більш небезпечними для конкретних об'єктів, порівняно з ділянками, що характеризуються широким резонансним діапазоном і меншими значеннями спектрального прискорення. Виділено таксонометричні ділянки, що характеризуються найбільшими значеннями спектрального прискорення.

12. Методика побудови математичних моделей шаруватої ґрунтової товщі, яка задовольняє вимогам Міжнародного агентства з атомної енергії і враховує нелінійне деформування ґрунту, впроваджена при оцінці сейсмічної безпеки відповідальних споруд Ташлицької ГАЕС, Канівської ГЕС, Запорізької АЕС, Южно-Української АЕС, Середньодніпровської ГЕС та компресорної станції «Яготин». У результаті чисельного аналізу сейсмічної реакції ґрунтової основи перерахованих об'єктів визначено прогнозовані (очікувані) кількісні параметри сейсмічної безпеки: амплітудний та спектральний склад сейсмічних коливань ґрунтів в основі відповідальних споруд.

ДОДАТОК 1

Параметри розрахункових спектрів реакції одиничних осциляторів з 5-% власним згасанням на 26 сейсмічних рухів заданих акселерограмами для 16 таксонометричних ділянок території Києва

Ділянка	$W_T (0,5 S_A(T)_{max}, g)$		$W_T (0,7 S_A(T)_{max}, g)$		1 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		2 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		3 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		3 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		4 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		5 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		6 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		7 максимум $((S_A(T)_{max}, g)$ Переважачий період 1 максимуму $T, сек$		площею підспектральної області S_{RS} (Метод Сімпсона)	Переважачий період 1 максимуму $T, сек$
1	4,24	2,4	0,076	0,2	0,105	0,28	0,083	0,4	-	-	0,085	0,75	0,084	0,95	0,103	1,5	0,094	2	0,110481	0,105		
2	3,44	2,42	0,121	0,2	0,155	0,28	-	-	-	-	0,105	0,65	0,1	1	0,139	1,5	-	-	0,143078	0,155		
3	2,42	0,22	0,133	0,22	0,222	0,28	0,224	0,4	-	-	0,149	0,65	-	-	0,106	1,5	0,109	2,6	0,153878	0,224		
4	0,66	0,19	-	-	0,204	0,28	0,224	0,4	-	-	0,154	0,65	-	-	0,09	1,5	-	-	0,144642	0,224		
5	0,61	0,42	-	-	0,189	0,28	0,235	0,4	-	-	0,179	0,65	-	-	0,09	1,5	-	-	0,147425	0,235		
6	2,56	2,14	-	-	0,103	0,28	0,115	0,4	-	-	0,115	0,65	0,1	1	0,121	1,5	-	-	0,123324	0,121		
7	2,42	1,82	-	-	0,068	0,3	0,079	0,4	-	-	0,119	0,65	0,122	0,95	0,117	1,5	-	-	0,117081	0,122		
8	1,83	1,1	-	-	0,091	0,3	0,106	0,4	-	-	0,152	0,7	0,159	0,9	0,126	1,5	-	-	0,132325	0,159		
9	2,16	1,65	-	-	0,06	0,3	-	-	-	-	0,109	0,7	0,126	0,95	0,124	1,5	-	-	0,115899	0,126		
10	3,48	2,42	-	-	0,061	0,3	0,087	0,4	-	-	0,101	0,65	0,098	1	0,126	1,5	-	-	0,120368	0,126		
11	2,59	1,74	-	-	0,107	0,28	0,095	0,4	-	-	0,117	0,7	0,113	0,95	0,112	1,5	-	-	0,115369	0,117		
12	2,03	0,72	0,077	0,18	0,105	0,3	0,141	0,4	-	-	0,135	0,65	0,1	0,95	0,094	1,5	-	-	0,119213	0,141		
13	3,33	2,2	-	-	0,086	0,3	0,096	0,4	-	-	0,122	0,65	-	-	0,153	1,45	0,136	2,2	0,139535	0,153		
14	0,49	0,17	0,122	0,18	0,186	0,28	0,273	0,4	0,209	0,5	0,168	0,65	-	-	0,116	1,45	0,132	2,4	0,170053	0,273		
15	0,51	0,17	-	-	0,25	0,28	0,21	0,4	0,165	0,5	0,155	0,65	-	-	0,117	1,45	0,136	2,4	0,162456	0,25		
16	2,74	2,42	0,159	0,18	0,194	0,28	0,142	0,4	-	-	0,153	0,65	-	-	0,136	1,65	0,147	2,4	0,155018	0,194		

ДОДАТОК 2

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Монографії:

1. Rushchitsky J., Kendzera O., **Semenova Y.** (2021) On the Seismic Waves Propagating in the Layered Earth Stratum. In: Bonali F.L., Pasquaré Mariotto F., Tsereteli N. (eds) Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht – P. 375-386. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_21.

2. Kendzera O., Rushchitsky J., **Semenova Y.** (2021) Rheological Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of the South Ukrainian Nuclear Power Plant. In: Bonali F.L., Pasquaré Mariotto F., Tsereteli N. (eds) Building Knowledge for Geohazard Assessment and Management in the Caucasus and other Orogenic Regions. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht – P. 365-373 https://doi.org/10.1007/978-94-024-2046-3_20.

Статті в наукових виданнях

3. Кендзера О.В., Вербицький С.Т., **Семенова Ю.В.**, Вербицька О.С. (2016). Стан і проблеми розвитку сейсмологічних досліджень для сейсмостійкого проектування. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 65, 83-189.

4. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2017). Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки // Світ геотехніки, 3, 4-14.

5. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2017). Деформаційні характеристики розрахункових моделей ґрунтової товщі // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 78, 17-29.

6. Дорофеев С., Егунов К.В., Егунов В.К., Кендзера А.В., Немчинов Ю.И., **Семенова Ю.В.**, Сорока Н.Н. (2017). Особенности определения нагрузок и воздействий - на объекты повышенного класса ответственности // Наука та будівництво, 2017, 4, 11-19.

7. **Семенова Ю.В.** (2018). Моделирование реакции грунтов на сейсмичные влияния для обеспечения сейсмостойкости споруд за европейскими стандартами (за материалами научного уведомления на заседании Президиума НАН Украины 30 мая 2018 г.) // Вісник Національної академії наук, 7, 40-47 <https://doi.org/10.15407/vsn2018.07.040>.

8. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2018). Влияние осадочной толщи на сейсмичные колебания на территории Ташлицької гідроаккумуляційної електростанції – Геодинаміка, 1(24), 91-99. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.091>.

9. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.**, Вербицкий С.Т., Егунов В.К., Лісовий Ю.В. (2019). Влияние локальных грунтовых условий на сейсмичные колебания майданчика Ташлицької ГАЕС // Наука та будівництво, 2, 11-19. DOI: 10.33644/scienceandconstruction.v19i1.65.

10. **Semenova Yu.** (2019). Comparison of the simulated peak ground acceleration at different sites located close to each other. // International Research Journal, 7 (85), 44-46 <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.85.7.008>.

11. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2019). Расчетные акселерограммы для прямого динамического метода определения сейсмических нагрузок // Геофизический журнал, 41(4), 210-216. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177389>.

12. Кендзера О.В., Микуляк С.В., **Семенова Ю.В.**, Скуратівський С.І. (2020). Моделирование сейсмичной реакции прослойки грунта в рамках нелокальной модели суцільного середовища // Геофизический журнал, 42(3), 47-58 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204700>.

13. Kenzera O.V., Mykulyak S.V., **Semenova Yu.V.**, Skurativska I.A., Skurativskyi S.I. (2020). Assessment of seismic response of a soil layer with the

oscillating inclusions // Геофизический журнал, 42(4), 3-17 DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i4.2020.210669>.

14. **Semenova Yu.**, Kendzera O. (2020). Determination of site amplification in the South Ukrainian NPP // Norwegian Journal of development of the International Science, 1(46), 9-12.

15. Kendzera O., **Semenova Y.** (2020a). Seismic zoning of Kyiv in physical parameters of soil oscillations // Geodynamics, 2 (29), 97-106 <https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.097>.

16. Kendzera O., **Semenova Yu.** (2020b). Spectral properties of soils of the Yagotin compressor station site (Ukraine) // Sciences of Europe, 1(55), 26-30

17. Кендзера А.В., **Семенова Ю.В.** (2021a). Вариации интегрального коэффициента усиления грунтами сейсмических колебаний на территории Киева. – Геофизический журнал, 1(43), 129-141. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225543>.

18. **Semenova Yu.** (2021). Modeling the influence of local soil conditions on the earthquake motion in the territory of Kyiv // Colloquium-journal, 3(90), 16-18 DOI: 10.24412/2520-2480-2021-390-16-18.

19. **Семенова Ю.В.** (2021a). Дослідження спектральних характеристик свіжонамивних пісків та ущільнених з часом пісків для оцінки їх сейсмічної стійкості // Norwegian Journal of development of the International Science, 2(55), 21-25. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-55-2-21-25.

20. **Семенова Ю.В.** (2021б). Методы учета влияния местных грунтовых условий на сейсмическую опасность строительной площадки // Sciences of Europe, 3(63), 10-14. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-63-3-10-14.

21. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2021б). Спектральне підсилення сейсмічних коливань грунтами на території Києва. - Допов. Нац. акад. наук Укр., 2, 65 - 70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.11.065>.

22. **Semenova Yu.** (2021). Seismic soil response at the base of the Srednedniprovskaaya hydroelectric power plant // International Journal of Innovative

Research in Science, Engineering and Technology, 10(5), 160-163.
DOI:10.15680/IJRSET.2021.1005002.

23. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., **Semenova Yu.V.**, Skurativska A. I., Skurativskiy S.I. (2021). Seismic response of a layered soil deposit with inclusions // Геофизический журнал, 43(2), 3-13.

24. **Семенова Ю.** (2021в). Оцінка частотних коливань ґрунтової товщі території Середньодніпровської ГЕС при сейсмічних навантаженнях // Colloquium-journal, 13(100), 28-32 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-13100-28-32.

25. **Semenova Yu.** (2021). Prediction of the influence of near-surface soils on seismic surface oscillations on the example of sites of the territory of Ukraine // Journal of Research in Environmental and Earth Sciences, 7(5), 11-16.

26. **Semenova Yu.** (2021). Effect of sand consolidation in course of time on seismic properties // Journal of Applied Geology and Geophysics, 9(3), 1, 1-5 DOI:10.9790/0990-0903010105.

27. **Semenova Yu.** (2021). The influence of near-surface soils on the enhancement of seismic movements in the problem of seismic protection of nuclear power plants // International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 3(5), 321-324.

28. **Семенова Ю.** (2021г). Сейсмічна реакція ґрунтової товщі в основі Ташлицької гідроакумуючої станції на динамічні навантаження // Colloquium-journal, 14(101), 14-19 DOI: 10.24412/2520-6990-2021-14101-14-19.

29. **Semenova Yu.** (2021). Seismic response of two engineering-geological sites of the Kanevskaya pumped storage power plant territory. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 8(3), 232-237 <https://doi.org/10.32628/IJSRST1218359>.

30. Kendzera, O., **Semenova, Y.** (2021). Dynamic Deformation Characteristics of Soil in the Tasks of Seismic Micro Zoning. European Journal of Environment and Earth Sciences, 2(3), 41-48. <https://doi.org/10.24018/ejgeo.2021.2.3.142>

Тези доповідей:

1. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.** (2017). Реологічні властивості геологічного середовища під будівельним майданчиком // Матеріали наукової конференції присвяченої пам'яті Т.З. Вербицького та Ю.Т. Вербицького «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», 1-2 червня 2017р. с.м.т. Верхнє Синьовидне ÷ Львів: СПОЛОМ, 43-46.

2. Егупов К.В., Кендзера А.В., **Семенова Ю.В.**, Егупов В.К., Лесовой Ю.В. (2017). Використання сейсмологічної інформації для науково-технічного супроводу проектування // Матеріали наукової конференції присвяченої пам'яті Т.З. Вербицького та Ю.Т. Вербицького «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», 1-2 червня 2017р. с.м.т. Верхнє Синьовидне ÷ Львів: СПОЛОМ, 58-61.

3. Кендзера А.В., Рушицкий Я.Я., **Семенова Ю.В.** (2017). Реологические модели грунтовой толи для проектирования сейсмостойких объектов // Международная научная конференция «Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии», посвященной 50-летию открытия Центральной геофизической обсерватории в г. Обнинске (г. Москва, 11–13 июля 2017 г.), 39.

4. Лісовий Ю.В., Гринь Д.М., **Семенова Ю.В.**, Вербицька О.С. (2017). Сейсмічна небезпека будівельного майданчика по бульвару Дружби Народів, 2 в м. Києві // Третя міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми геосередовища і зондуючих систем», присвячена пам'яті видатним українським вченим у галузі електромагнітних досліджень: доктору фіз.-мат. наук Володимирі Миколайовичу Шуману, доктору геол. наук Сергію Миколайовичу Куліку, Київ, 3-5 жовтня 2017 р.

5. **Semenova Yu.**, Kendzera O. (2017). Influence of a soil strata with rheological properties on parameters of a seismic hazard // Abstract Book. XI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment” 11–14 October 2017, Kyiv, Ukraine. – Kyiv: KNU, 1. DOI: 10.3997/2214-4609.201800093.

6. Kendzera O.V., Rushchitsky J.J., **Semenova Yu.V.** (2017). Seismicity on the territory of Ukraine and modern methods on seismic hazard parameters determination for building sites // The 2017 China (Dongguan) International Science and Technology Cooperation Week and 1st China (International), CHINA, 8-10 December, 2017.

7. Лісовий Ю.В., **Семенова Ю.В.**, Гринь Д.М., Вербицька О.С., Амашукелі Т.А., Фарфуляк Л.В. (2018). Сейсмічне мікрорайонування будівельного майданчика в м. Києві. / Геологія і корисні копалини України: Збірник тез наукової конференції, присвяченої 100-річному ювілею Національної академії наук України та Державної служби геології та надр України (Київ, 2–4 жовтня 2018 р.) / НАН України, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка. – Київ, 2018, 265.

8. Кендзера О.В., **Семенова Ю.В.**, Вербицький С.Т., Єгупов В.К., Лісовий Ю.В. (2018). Вплив локальних ґрунтових умов на сейсмічні коливання майданчика Ташлицької ГАЕС // Будівництво в сейсмічних районах України: зб. тез доп. XI Всеукр. наук.- техн. конф. — Одеса: ОДАБА, 13-15.

9. Iegupov K., Kendzera A., **Semenova Yu.**, Iegupov V., Lisovyi Yu. (2018). Use of seismological information for the design of multistory buildings // 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE). - Thessaloniki, Greece, June 18-21, 2018, 1-8 <http://www.16ecee.org>.

10. **Semenova Yu.**, Kendzera O. (2018). Influence of a soil strata with rheological properties on parameters of a seismic hazard. - Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology (Vol.78, No. 3) // Materials of 11th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Session: Geophysics In Engineering Geology, Soil Science, Archaeology, 17-29. (DOI: 10.3997/2214-4609.201800093).

11. Kendzera A., **Semenova Yu.** (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, 1 – 5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902111>.

12. Kendzera O., Rushchitsky Je., **Semenova Yu.** (2019). On the seismic waves propagating in the layered Earth stratum // Abstract volume. NATO Advanced Research Workshop G5566 “Building Civil Protection Capacity to Mitigate Geohazards in the Caucasus: A Regional Approach”, 8-10 October 2019, Tbilisi, Republic of Georgia. P.34.

13. Kendzera O., Rushchitsky Je., **Semenova Yu.** (2019). Influence of a soil strata with rheological properties on seismic hazard parameters // Abstract volume. NATO Advanced Research Workshop G5566 “Building Civil Protection Capacity to Mitigate Geohazards in the Caucasus: A Regional Approach”, 8-10 October 2019, Tbilisi, Republic of Georgia. P.35.

14. **Semenova Yu.** (2019). Effect of a soil with nonlinear properties on seismic hazard parameters // AlpArray Scientific Meeting hosted by Mountain-Building in 4-Dimensions (4D-MB) Senckenberg Institut, Grüner Hörsaal, Arthur-von-Weinberg-Haus, Robert-Mayer-Str. 2, 60325 Frankfurt am Main, Germany, November 13-15, 2019.

15. **Semenova Yu.**, Kendzera A. (2020). Seismic site effects evaluation of the Yagotin compressor station (Ukraine) // Conference Proceedings, Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020, May 2020, 1 - 6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo091>.

16. **Semenova Yu.**, Kendzera A. (2020). Amplification Properties of Soils in Assessing the Seismic Hazard of Sites in Ukraine // 22th International Conference on Advances in Civil and Mechanical, Singapore, Nov 19-20, 2020.