

Сейсмічна реакція різних за будовою ділянок території Києва на сейсмічні навантаження

О. В. Кендзера, Ю. В. Семенова, 2021

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 18 червня 2021 р.

Метою досліджень, описаних у статті, є оцінювання сейсмічної реакції трьох різних таксонометричних ділянок, виділених методом інженерно-геологічних аналогій у межах території Києва, на сейсмічні навантаження з різним спектральним складом і максимальною амплітудою від 0,01 g до 0,06 g. Оцінювання впливу місцевих ґрунтових умов на інтенсивність прояву землетрусів є важливим завданням сейсмостійкого проектування і будівництва. Ґрунтова товща в основі досліджуваного майданчика діє на сейсмічні коливання як фільтр. Вона підсилює або послаблює амплітуду сейсмічної хвилі, що поширюється від корінних порід до вільної поверхні. Розглянуто механізми можливого підсилення сейсмічних коливань різними ґрунтовими комплексами та методи розрахунку сейсмічної реакції на сейсмічні навантаження різної інтенсивності. Як аналітичний інструмент для аналізу реакції досліджуваних таксонометричних ділянок на сейсмічні коливання (сейсмічної реакції) застосовано еквівалентний лінійний аналіз, який є всесторонньо вивченим і широко використовуваним у практиці інженерної сейсмології. Для виділених ділянок побудовано моделі ґрунтових товщ і розраховано графіки зміни з глибиною пікової зсувної деформації (pick shear strain) і пікового прискорення ґрунту PGA (pick ground acceleration), а також прогнозні (очікувані із заданою імовірністю неперевищення) амплітудні спектри Фур'є сейсмічних коливань у верхньому шарі та спектри реакції одиничних осциляторів із 5%-ним згасанням на сейсмічні впливи з максимальною амплітудою від 0,01 g до 0,06 g. Наведено результати порівняльного аналізу зміни величини зазначених параметрів на окремих ділянках Києва. Показано, що для оцінювання потенційної небезпеки від сейсмічних коливань ґрунту під час землетрусів необхідно використовувати максимальну кількість розрахункових параметрів, якими характеризують сейсмічну небезпеку конкретних ділянок та які застосовують для визначення сейсмостійкості будинків і споруд. Найповніше сейсмічну небезпеку для розрахунку сейсмостійкості об'єктів задають розгорнутим у часі повним вектором сейсмічних коливань: розрахунковими акселерограмами, сейсмограмами та велосиграмами. Наведені результати розрахунків планується використовувати з метою вирішення методологічних і практичних завдань захисту від землетрусів, здатних реалізуватися на різних ділянках території Києва.

Ключові слова: аналіз сейсмічної реакції ґрунту, спектр реакції, амплітудний спектр Фур'є, пікове прискорення ґрунту, пікова зсувна деформація ґрунту.

Вступ. Інтенсивність та характер коливань ґрунту на поверхні залежать від характеристик джерела землетрусу, шляху проходження хвилі від вогнища до підшви осадового шару та місцевих ґрунтових умов (геологічна будова та властивості ґрунтових шарів). Значне підсилення пікового прискорення ґрунту й спектрального прискорення (спектра реакції одиничних

осциляторів) на деяких ділянках зазвичай пояснюють фільтрувальними властивостями геологічного середовища.

Підсилення сейсмічних коливань унаслідок впливу місцевих ґрунтових умов яскраво проявилися під час таких подій ХХ ст., як землетрус в Герреро (Мехіко, 1985 р.), Вірменський землетрус (Спітак, 1988 р.), землетрус у США в районі зато-

ки Сан-Франциско (Лома-Пріета, 1989 р.), Японський землетрус (Кобе, 1995 р.), землетруси в Індії (Коджаелі, 1999 р.; Адапазари та Бхуджі, 2001 р.). Під час цих сейсмічних подій спостерігалися ефекти суттєвого підсилення коливань місцевими ґрунтами, навіть у віддалених від епіцентру місць (100—400 км). Трансформація сейсмічних коливань при поширенні від корінної породи крізь ґрунтові шари до поверхні виявляється не лише у збільшенні амплітуди коливань у верхніх шарах, змінюються також спектральний склад і тривалість коливань. Сейсмічний аналіз реакції ґрунту для конкретної ділянки полягає у визначенні впливу місцевих ґрунтових умов на підсилення (зміну) інтенсивності сейсмічних коливань і розрахунку спектрів реакції ґрунту, потрібних для визначення сейсмостійкості споруд спектральним методом, рекомендованим ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво в сейсмічних районах України» для цілей сейсмостійкого проектування.

Перші наукові повідомлення про вплив місцевих ґрунтових умов на інтенсивність сейсмічних коливань, про прояви пошкодження та руйнування будівель у разі сейсмічних навантажень 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 у межах одного міста та більшості пошкоджень будівель певної висоти в межах однієї і тієї самої місцевості під час землетрусів у Мексиці (Мехіко, 1957 р.), Македонії (Скоп'є, 1963 р.) та Венесуелі (Каракас, 1967 р.), привернули увагу інженерної спільноти стосовно досліджень питання впливу місцевих ґрунтових умов на шкоду, завдану землетрусами.

На сьогодні оцінювання впливу місцевих ґрунтових умов на інтенсивність прояву землетрусів є одним із найважливіших завдань інженерної практики сейсмостійкого будівництва й потребує кількісної оцінки поведінки ґрунту при сейсмічних навантаженнях. Ґрунтова товща в основі досліджуваного майданчика діє як фільтр, тобто підсилює або послаблює амплітуди

сейсмічних коливань, що поширюються від корінних порід до вільної поверхні ґрунту, змінює їх тривалість і спектральний склад. Сейсмічні коливання на вільній поверхні залежать від частотної характеристики ґрунтової товщі та спектрального складу коливань у сейсмічних хвилях.

Катастрофічні наслідки землетрусів зумовлені передусім руйнуванням будівель та споруд. Найефективнішим способом захисту від землетрусів, з інженерної точки зору, є сейсмостійке проектування і будівництво. Необхідні проекти будівель, здатних протистояти розрахунковим (плановим) сейсмічним коливанням ґрунту. Параметри сейсмічних коливань місцевих приповерхневих ґрунтів мають прогнозувати сейсмологи з урахуванням їх фільтрувальних властивостей. Отже, для зниження ризиків руйнівних наслідків землетрусів необхідна побудова адекватної розрахункової моделі динамічної поведінки системи ґрунт—будівля за прогнозованих сейсмічних навантажень. Побудова таких моделей потребує детальних досліджень великої кількості параметрів, властивостей та закономірностей їх прояву як у ґрунтах, так і в самій конструкції спроектованої (експлуатованої) будівлі.

Найважливіші параметри сейсмічних коливань ґрунту для інженерних розрахунків з метою сейсмостійкого проектування та будівництва такі: амплітудні пікові параметри коливань ґрунту (пікові прискорення, пікові швидкості та пікові зміщення ґрунту), тривалість коливань та частотний склад. Частотний склад сейсмічних коливань на поверхні ґрунтової товщі суттєво впливає на реакцію споруди в цілому та окремих її конструкцій за сейсмічних навантажень. Найнебезпечнішими є резонансні ефекти, за яких частотний склад коливань ґрунту і власні частоти структури є близькими.

Тривалість сейсмічних коливань суттєво впливає й на сумарний сейсмічний ефект. Сейсмічні коливання з помірними піковими прискореннями, але із значною тривалістю можуть завдати більшої шкоди, ніж сейсмічні коливання з більшим піко-

вим прискоренням і меншою тривалістю.

Механізми підсилення сейсмічних коливань ґрунтами. 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. В разі поширення сейсмічних коливань від нижчезалягаючих твердих ґрунтів до приповерхневих м'яких швидкість сейсмічних хвиль зменшується, а амплітуда збільшується. Відбувається перехід потенціальної енергії в кінетичну та накопичення енергії коливань за багатократного їх відбивання в шарах ґрунту.

Існує декілька механізмів, які підсилюють амплітуду сейсмічних коливань на поверхні та у внутрішніх шарах ґрунтової товщі. Перший механізм ґрунтується на резонансних явищах, які виникають, якщо частота коливань сейсмічної хвилі збігається з частотою власних коливань ґрунтових відкладів. Спрощено власну частоту ґрунтового масиву для поперечної або поздовжньої хвилі оцінюють за такою формулою [ДБН В.1.1-12:2014, 2014]:

$$f_n = \frac{V}{4H},$$

де V — швидкість поширення об'ємної хвилі; H — товщина ґрунтового масиву.

Якщо частота коливань у сейсмічній хвилі є близькою до власної частоти ґрунтової товщі, то амплітуда коливання ґрунту на цій частоті збільшується. Величина підсилення залежить від співвідношення (контрастності) жорсткостей шарів ґрунтової товщі:

$$I = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2},$$

де ρ_1 — густина ґрунтового шару, індекс 1 стосується нижнього шару, індекс 2 — шару, що залягає вище. Коефіцієнт підсилення коливань зростає із збільшенням відношення жорсткостей шарів.

Ґрунти з низькою швидкістю поширення поперечної хвилі, особливо якщо вони підстилаються твердими кристалічними

породами, можуть значно підсилювати амплітуду сейсмічних коливань, потенційно здатних спричинити зменшення носійної здатності ґрунту, що може призвести до руйнування споруди або її окремих конструкцій. Велика різниця швидкості поширення сейсмічних хвиль між молодими низькошвидкісними м'якими відкладами та древнім палеозойським фундаментом створює сильний контраст сейсмічної жорсткості — межу відбиття, заломлення і перевипромінювання сейсмічної енергії та фазового перетворення сейсмічних хвиль [Chen et al., 1996].

Інший механізм підсилення пов'язаний з фізичною закономірністю поширення сейсмічних коливань у ґрунтовій товщі, внаслідок чого величина потоку хвильової енергії, яка визначається, як $\rho V_s \dot{u}^2$, де \dot{u} — прискорення сейсмічних коливань, залишається постійною [Aki, Richards, 1980]. У результаті амплітуда сейсмічної хвилі є вищою у низькошвидкісному ґрунтовому шарі порівняно із високошвидкісним. Отже, типи ґрунтів, що характеризуються низькою швидкістю поширення поперечної хвилі, такі як пухкі піски та м'які глини, можуть значно підсилювати сейсмічні коливання.

Інструментальні спостереження за сейсмічними коливаннями ґрунту вказують на той факт, що ґрунтова товща послаблює сейсмічну енергію на високих частотах [Booge, 1983]. Згасання енергії сейсмічної хвилі зумовлене трьома основними факторами: геометричним розходженням (обумовленим зменшенням питомої енергії на одиницю площі фронту хвилі у зв'язку з її збільшенням в міру віддалення від джерела); розсіюванням на неоднорідностях середовища та непружним поглинанням або власним згасанням (зумовленим 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 засвідчують, що підсилення коливань ґрунту більш виражене за слаб-

ких сейсмічних впливів, ніж за сильних через нелінійну поведінку ґрунту. Найбільші підсилення під час землетрусів у 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 публікації [Darragh, Shakal, 1991] порівняні сейсмічні коливання ділянок, складених м'якими і твердими ґрунтами за сильних та слабких сейсмічних впливів. Більші підсилення були зафіксовані на ділянках, складених м'якими ґрунтами, ніж твердими, особливо за слабких сейсмічних впливів. Крім того, з огляду на амплітудні спектри Фур'є ділянки з м'якими ґрунтами підсилювали сейсмічні коливання з коефіцієнтами підсилення від 12 до 25 з періодом коливання 1 с порівняно з ділянками, складеними твердими породами за слабких сейсмічних коливань. Підсилення сейсмічних коливань у разі сильних сейсмічних впливів було в 3 рази більшим на ділянках з м'якими ґрунтами, ніж на ділянках з твердими породами [Darragh, Shakal, 1991]. Ділянки, складені твердими ґрунтами, підсилювали сейсмічні коливання у 2—3 рази як за сильних, так і слабких сейсмічних впливів. Згідно з дослідженнями, підсилення сейсмічних коливань ґрунтами на порівнянних епіцентральної відстанях, як правило, є вищим у разі землетрусів меншої величини або у більш низькошвидкісних ґрунтах, що пояснюється їх нелінійною поведінкою [Darragh, Shakal, 1991]. Нелінійна поведінка ґрунту сильніше виявляється за інтенсивних сейсмічних впливів і в низькошвидкісних ґрунтах.

Аналіз сейсмічної реакції ґрунтів. Цей аналіз застосовують для прогнозування сейсмічних коливань на поверхні з урахуванням впливу місцевих ґрунтових умов за ймовірних землетрусів. Він є класичною задачею поширення у товщі ґрунтових шарів сейсмічних коливань, які падають на підоснову осадового чохла із пружного півпростору. В інженерній сейсмології існує два основні підходи до проведення аналізу сейсмічної реакції ґрунтів [Kramer, 1996].

Один з них відомий як лінійний аналіз сейсмічної реакції ґрунту, інший називають нелінійним. Згадані підходи використовують залежно від того, який тип поведінки ґрунту передбачається в разі майбутнього розрахункового землетрусу. Лінійний аналіз сейсмічної реакції ґрунту використовують у разі лінійного взаємозв'язку напруження та зсувної деформації ґрунту. Нелінійний аналіз реакції ґрунту на сейсмічне навантаження використовують за нелінійного взаємозв'язку. При цьому розглядають два підходи: еквівалентно лінійний та повністю нелінійний.

Найпоширенішим у практичному застосуванні є еквівалентний лінійний метод, оскільки його застосування є найбільш виправдане щодо адекватності отриманих результатів і доступності вхідних даних для проведення аналізу. Одновимірний еквівалентно-лінійний аналіз сейсмічної реакції ґрунтової товщі вперше був сформульований у публікаціях [Idriss, Seed, 1968; Schnabel et al., 1972]. Він ґрунтується на припущенні вертикального поширення поперечних коливань через однорідні горизонтальні ґрунтові шари нескінченної бічної протяжності. Припущення того, що поперечні коливання поширюються вертикально до земної поверхні, цілком прийнятне, оскільки, навіть якщо на глибині зсувні коливання не поширюються вертикально, напрямок їх поширення ставатиме майже вертикальним з наближенням до земної поверхні. Це зумовлено загальним зменшенням швидкості поширення поперечної хвилі із зменшенням відстані від поверхні Землі [Kavazanjian, 1997]. Кожен шар ґрунтової товщі за еквівалентного лінійного аналізу апроксимують в'язкопружною моделлю Кельвіна—Фойгта. Розрахунки виконуються в частотній зоні, що значно збільшує швидкість і чисельну стабільність розрахунків. Для врахування нелінійної поведінки ґрунту проводиться ітераційна процедура, під час якої визначають модуль зсуву і коефіцієнт поглинання, що відповідають ефективній зсувній деформації. Відповідні залежності підбирають окремо для кожного шару ґрунтової товщі або з літера-

турних джерел, або з експериментальних результатів, отриманих у лабораторних чи польових умовах. Обмеженням еквівалентного лінійного аналізу є прийняте допущення, що деформація дорівнює нулю в разі припинення навантаження. Оскільки в'язкопружний матеріал перебуває в умовах, коли напруження не досягають межі його міцності, у ньому не виникає розривів і руйнувань [Kramer, 1996]. Отже, для регіонів, де відбуваються інтенсивні руйнівні землетруси, слід застосовувати повністю лінійний аналіз.

Аналіз сейсмічної реакції різних за геологічною будовою ділянок, виділених на території Києва. Нижче наведено результати аналізу сейсмічних коливань у сейсмогеологічних моделях верхньої частини ґрунтового профілю, побудованих для таксонометричних ділянок, що виділені в межах території Києва методом інженерно-геологічних аналогій [ДБН А.2.1-1-2014, 2014; Kendzera, Semenova, 2020]. Розглянуто реакцію ґрунту на сейсмічні навантаження із застосуванням еквівалентного лінійного аналізу [Idriss, Seed, 1968; Schnabel

Усереднена сейсмогеологічна модель ґрунтової товщі для аксонометричних ділянок

№ з/п	Літологічний склад	Товщина, H, м	V_s , км/с	ρ , г/см ³
<i>Ділянка 1</i>				
1	Суглинок лесоподібний, озерний, алювіальний	30	250	1,85
2	Морена, супісок	10	280	1,8
3	Суглинок озерний, алювіальний	15	250	1,85
4	Піски і пісковики	20	340	1,8
5	Глини безкарбонатні, мергелі світло-сірі	25	600	1,92
6	Піски зеленувато-сірі, глауконіто-кварцові	45	500	1,85
7	Піски і пісковики, крем'янисті	15	520	1,95
8	Глини і алеврити	120	650	1,9
9	Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
10	Строкаті глини, алевроліти, пісковики	35	1300	2,1
11	Діорити		2900	2,7
<i>Ділянка 2</i>				
1	Суглинок лесоподібний, озерний, алювіальний	30	250	1,85
2	Морена, супісок	10	280	1,8
3	Суглинок озерний, алювіальний	15	250	1,85
4	Піски зеленувато-сірі, глауконіт-кварцові	40	500	1,85
5	Піски і пісковики, крем'янисті	10	520	1,95
6	Глини і алеврити	100	650	1,9
7	Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
8	Строкаті глини, карбонатні, щільні	40	1200	1,95
9	Граніти порфіробластичні		2700	2,6
<i>Ділянка 3</i>				
1	Пісок алювіальний	20	300	1,75
2	Піски зеленувато-сірі, глауконіт-кварцові	40	500	1,85
3	Піски і пісковики, крем'янисті	10	520	1,95
4	Глини і алеврити	100	650	1,9
5	Піски сірі з прошарками алевритів, вуглистих глин	10	600	1,95
6	Строкаті глини, карбонатні, щільні	40	1200	1,95
7	Граніти порфіробластичні		2700	2,6

et al., 1972]. Як вхідні (зондувальні) рухи було відібрано 26 акселерограм з різним спектральним складом та різною максимальною амплітудою від 0,01 г до 0,06 г. Максимальні амплітудні значення розрахункових прискорень взято на основі узгодження даних щодо сейсмічної небезпеки території України, вираженої в одиницях сейсмічної інтенсивності, та імовірнісних значень пікових прискорень (PGA), що їй відповідають [Національний..., 2010].

Розглянемо три аксонометричні ділянки, виділені в межах Києва на правому березі Дніпра, що межують між собою [Kendzera, Semenova, 2020]. Основні параметри сейсмічних властивостей ґрунтових товщ досліджуваних ділянок наведено в таблиці. Товщина осадового шару усереднених моделей досліджуваних ділянок змінюється від 220 (ділянка 3) до 325 м (ділянка 1).

При сейсмічному аналізі важливим кроком є ідентифікація та кількісне визначення «слабких» шарів, в яких можуть виникати нелінійні ефекти. Необхідно враховувати, що «слабкий» шар у разі динамічного (сейсмічного) аналізу може відрізнитись від «слабкого» шару при статичному аналізі. Наприклад, насичений шар піску вважають придатним матеріалом для закладання в ньому фундаменту споруди щодо статичних навантажень. Однак такий шар може бути схильним до розрідження за інтенсивних сейсмічних навантажень, і, отже, він стає «слабким» шаром за динамічного аналізу.

Склад кожного шару ґрунтової товщі, його фізико-механічні властивості є важливими факторами впливу на величину деформації ґрунту та характер його динамічної реакції при збудженні коливаних сейсмічними хвилями.

На рис. 1 представлено графіки зміни пікової зсувної деформації з глибиною при зондуванні моделей ділянок 1—3 сейсмічними коливаннями, що імітують 26 вхідних рухів.

Слід зазначити, що з геологічної позиції, на перший погляд, сейсмогеологічні моделі (див. таблицю) досліджуваних ділянок 1—3 мають подібні ґрунтові умови, однак

максимумами зсувної деформації помітно різняться як за величиною, так і за відміткою глибини залягання максимумів (див. рис. 1). На графіках зміни пікової зсувної деформації з глибиною при проходженні 26 вхідних сейсмічних рухів бачимо, що найбільші значення спостерігаються в моделі ділянки 2, а саме 0,17 % (приблизно вдвічі більші значення порівняно з іншими моделями) на глибині 35 м у низькошвидкісному шарі, складеному моренними відкладами та супіском. У моделі ділянки 1 найбільші значення пікової зсувної деформації (0,08—0,087 %) змінюються стрибкоподібно у верхніх шарах: на глибині 35 м ґрунтовий шар складений мореною та супіском; на глибині приблизно 65 м — пісками та пісковиками. У моделі ділянки 3 спостерігаються найменші значення пікової зсувної деформації — до 0,067 % у нижніх шарах на глибині 180—110 м.

На рис. 2 представлено графіки зміни пікового прискорення ґрунту PGA з глибиною в моделях трьох досліджуваних ділянок при проходженні 26 вхідних рухів від кристалічного фундаменту до вільної поверхні.

Графіки зміни PGA з глибиною демонструють різке збільшення PGA зі зменшенням глибини ближче до поверхні, причому подібна тенденція спостерігається для всіх трьох досліджуваних ділянок. Збільшення прискорень поблизу земної поверхні головним чином пояснюється зменшенням швидкості поширення поперечної хвилі із зменшенням глибини, контрастом імпедансу (сейсмічної жорсткості) у поверхневому ґрунті та нульовим зсувним напруженням (вільної поверхні) на земній поверхні, що приводить до переходу потенціальної енергії сейсмічних коливаних у кінетичну. Рис. 2 демонструє, що найбільше значення PGA у верхньому шарі спостерігається в моделі ділянки 3 та становить 0,054 г. PGA на поверхні в моделі ділянки 2 дорівнює 0,051 г, а на поверхні в моделі ділянки 1 — 0,038 г. Коливання ґрунту з більшими значеннями PGA, як правило, вважають більш руйнівними, ніж сейсмічні коливання з меншими піковими прискореннями. Однак дуже ви-

сокі значення PGA, які тривають короткий проміжок часу і характеризуються високими частотами, не можуть нанести значної шкоди багатьом типам протяжних об'єктів і конструкцій з низькими власними частотами коливань. Слід мати на увазі, що з інженерного погляду високими значеннями PGA можна знехтувати в разі одиничного викиду великої амплітуди або якщо частоту коливання з високим значенням PGA зафіксовано за межами власних частот коливань будівлі. Тому при інтерпретації результатів досліджень необхідно враховувати спектральний склад сейсмічних коливань.

Рис. 3 ілюструє амплітудні спектри Фур'є коливань ґрунту у верхньому шарі досліджуваних ділянок 1—3 при їх зондуванні 26 сейсмічними коливаннями.

Амплітудний спектр Фур'є коливань верхнього шару моделі ділянки 1 є свідченням того, що більша частина енергії сейсмічних коливань у верхньому шарі моделі ґрунту має досить широкий частотний діапазон — від 0,2 до 1,7 Гц, ділянки 2 — 0,23—1,3 Гц, ділянки 3 — 0,28—0,45 Гц.

Порівняння графіків зміни значень пікових прискорень ґрунту (PGA) на різних ділянках з використанням 26 вхідних зондувальних рухів (рис. 3) показало, що найбільші значення PGA у верхньому шарі (0,054 g) спостерігаються в моделі ділянки 3. Амплітудний спектр Фур'є коливань у верхньому шарі цієї ділянки характеризується хоча й найбільшим значенням амплітуди прискорення, проте найменшим значенням абсолютної ширини спектра — 0,17 Гц. Абсолютна ширина амплітудного спектра Фур'є коливань у верхньому шарі моделі ділянки 1 дорівнює 1,5 Гц, а ділянки 2 — 1,07 Гц.

На рис. 4 показано спектри реакції на сейсмічні впливи (з різним спектральним складом та максимальною амплітудою від 0,01 g до 0,06 g) одиничних осциляторів, отримані в результаті аналізу сейсмічної реакції на ділянках 1—3. Спектр реакції є важливим показником, яким задають прогнозовані параметри сейсмічної небезпеки, необхідні для розрахунків додаткових сей-

смічних навантажень спектральним методом відповідно до вимог [ДБН В.1.1-12:2014, 2014].

Спектр реакції є діаграмою, яка відображає максимальну реакцію осциляторів з одним ступенем свободи, заданими власними частотами і власними згасаннями коливань на сейсмічні впливи. За змінням власної частоти (періоду) та власного коефіцієнта 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 поширення швидкості або зміщення системи (конструкції). Вперше ідея використання спектрів максимальної реакції для зображення сейсмічних впливів була викладена в 1926 р. у публікації К. А. Сюехіро [Suyehiro, 1926]. На сьогодні використання спектрів реакції є важливим та широко застосованим методом у теорії і практиці розрахунків будівель і споруд на сейсмостійкість, використання якої регламентується усіма вітчизняними і більшістю зарубіжних нормативних будівельних документів.

Аналіз результатів, представлених на рис. 4, показав, що ширина спектрів реакції для ділянок 1 і 2 майже однакова і становить близько 2,4 Гц. Логарифмічна ширина спектра реакції ділянки 3 майже в 4 рази менша порівняно з шириною спектра реакції досліджуваних ділянок 2, 3, проте вона характеризується найбільшим спектральним прискоренням 0,22 g на частотах 0,28 і 0,4 Гц. Максимальні спектральні прискорення 0,1 g спектра реакції ділянки 1 спостерігаються на частотах 0,28 і 1,5 Гц. Інакше кажучи, у цьому випадку відбувається підсилення спектрального прискорення у межах як низьких, так і середніх частот. Подібною ситуація відбувається у спектрі реакції ділянки 2: максимальні спектральні прискорення 0,154 g і 0,139 g відповідають частотам 0,28 і 1,5 Гц. Отже, можна стверджувати, що спектральні прискорення ділянок 1 і 2 збільшуються в межах низьких і середніх частот, а ділянки

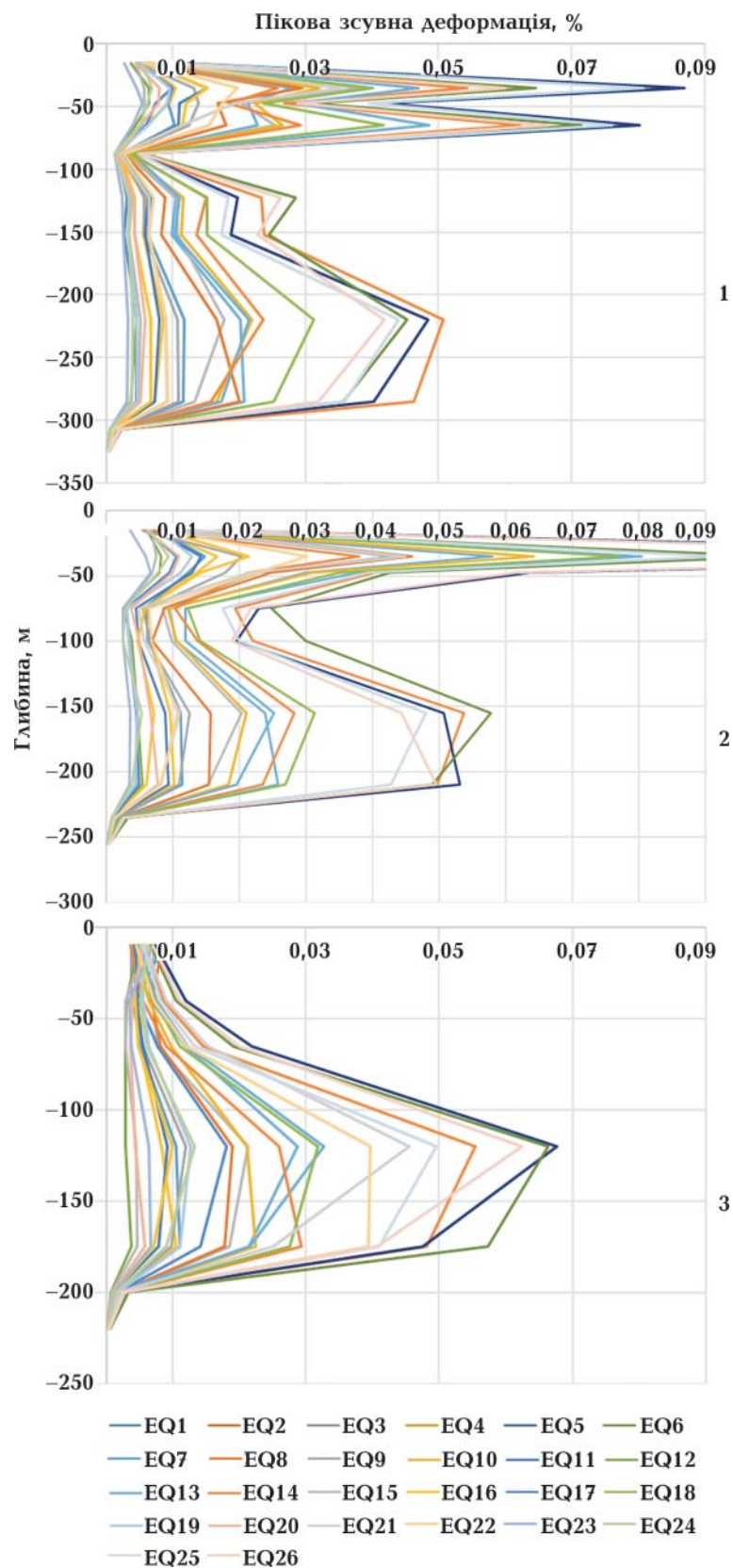


Рис. 1. Зміни пікової зсувної деформації з глибиною в моделях ділянок 1—3 для 26 вхідних сейсмічних рухів.
 Fig. 1. Peak shears train with depth in sites № 1 (26 in put motions).

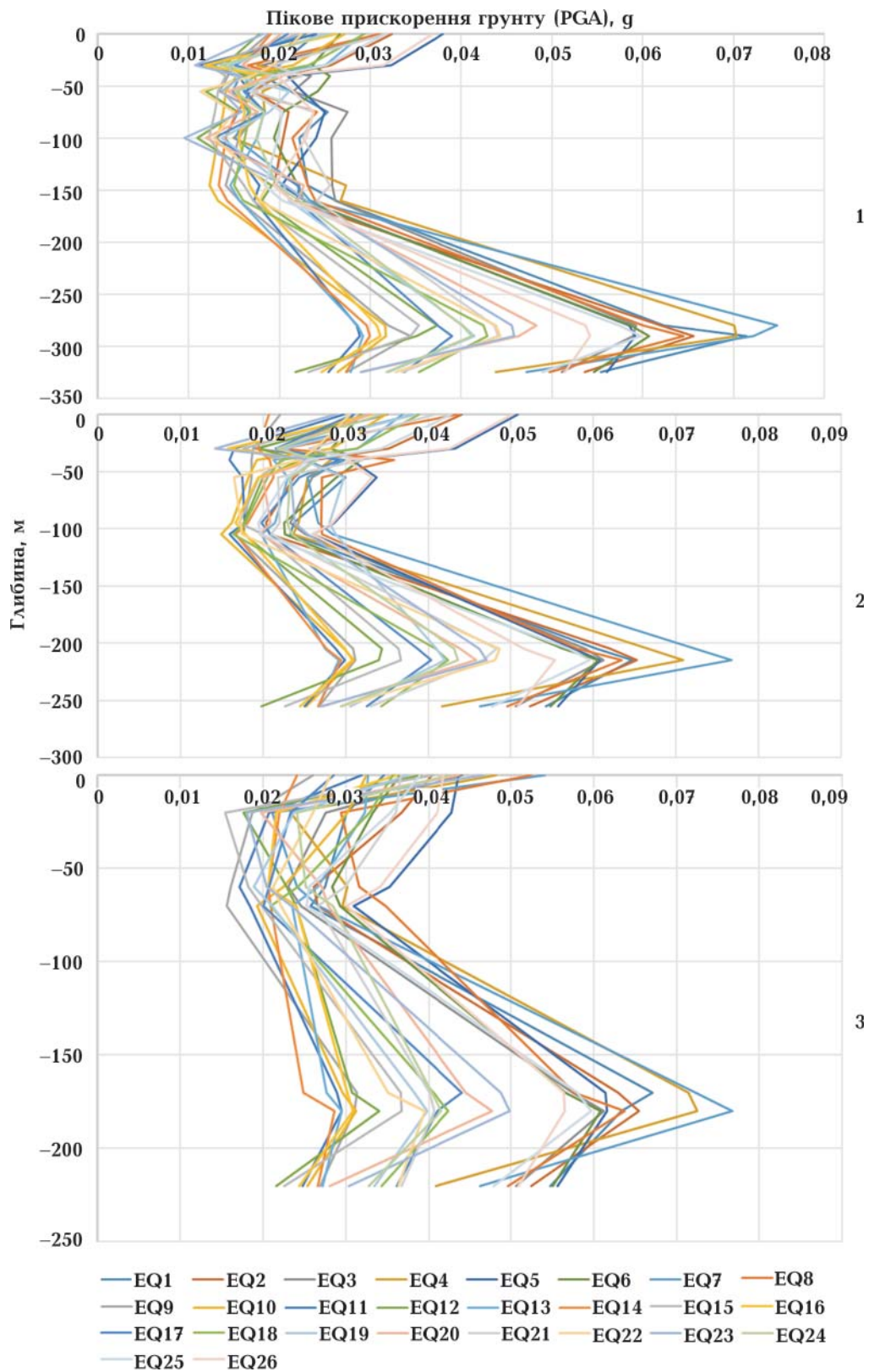


Рис. 2. Зміни пікових прискорень ґрунту PGA з глибиною для 26 зондувальних сейсмічних рухів у моделях ділянок 1—3.

Fig. 2. Plots of PGA versus depth for 26 seismic motions in sites model 1.

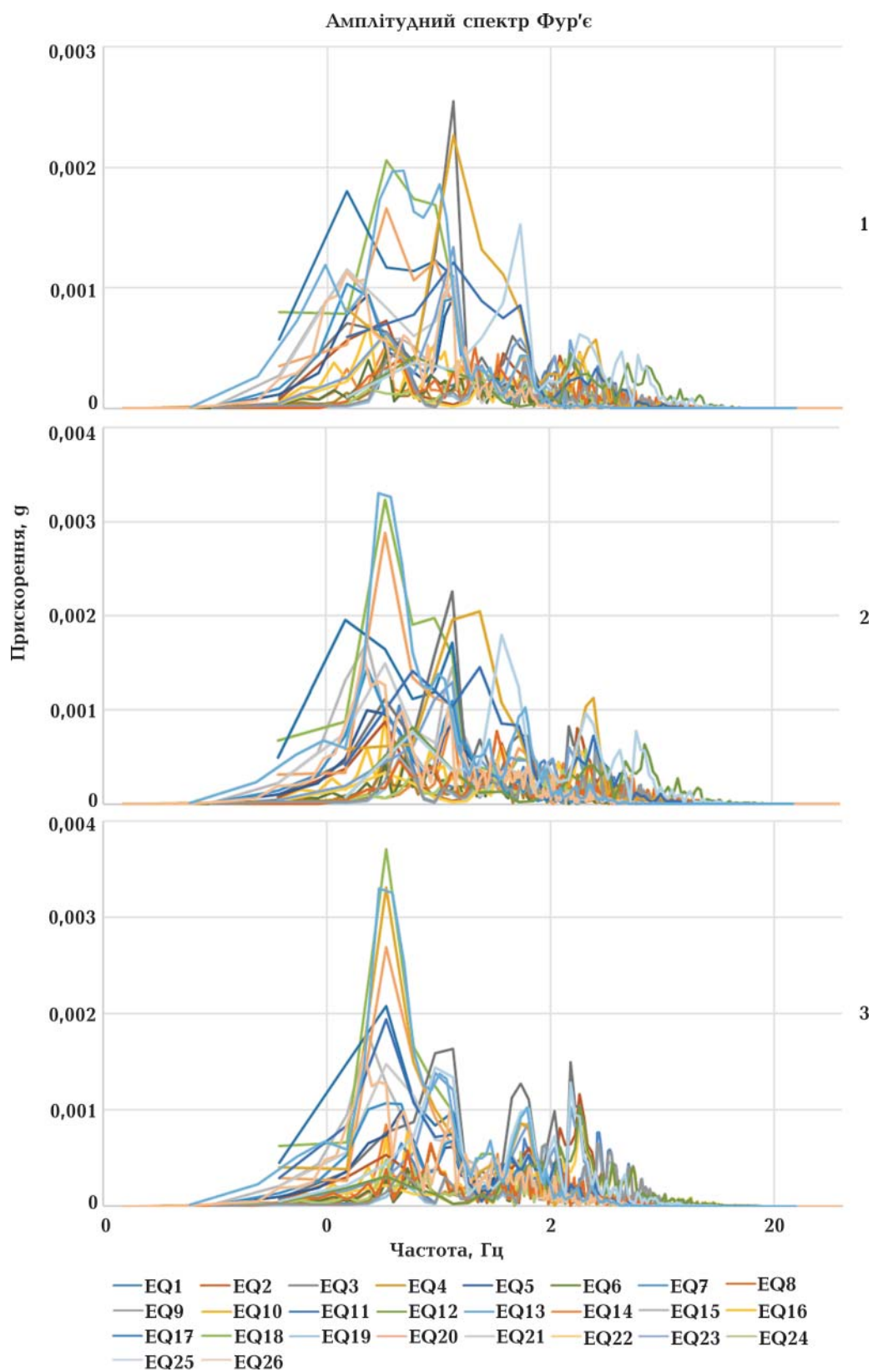


Рис. 3. Амплітудні спектри Фур'є сейсмічних коливань у верхньому шарі моделей ділянок 1—3 як результат їх зондування 26 моделями сейсмічних впливів.

Fig. 3. Fourier amplitude spectra in the upper layer of the model of sites 1—3 of the 26 seismic in put motions.

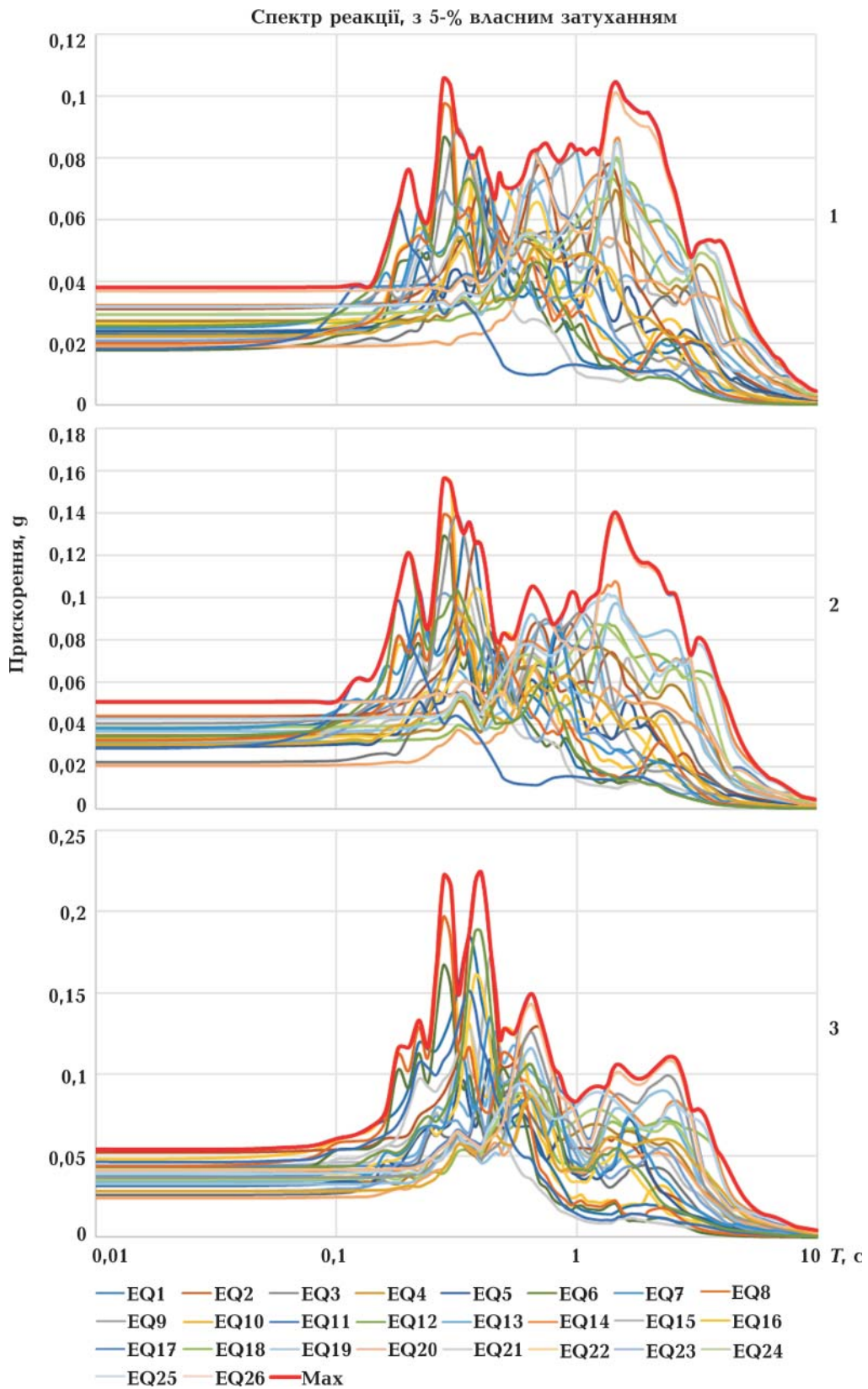


Рис. 4. Розраховані для ділянок 1—3 спектри реакції одиничних осциляторів з 5%-ним власним згасанням на 26 сейсмічних рухів, заданих акселерографами.

Fig. 4. The 5%-damped response spectrum of the 26 accelerograms for sites 1—3.

3 — підсилюються в 1,4—2 рази сильніше порівняно з такими ділянками 1 і 2, але лише у межах низьких частот.

Оцінити, яка з ділянок характеризується «гіршими» умовами із сейсмічного погляду, можна лише для конкретного об'єкта. Проте з урахуванням більш широкого частотного діапазону як спектра Фур'є, так і спектрів реакції на сейсмічні збудження ділянок 1 і 2 можна стверджувати, що на цих ділянках при розрахунках сейсмостійкості виявиться більше сейсмічно уразливих об'єктів і конструкцій. Проте спектральні прискорення більш підсилюються на ділянці 3, тому для об'єктів з близькими власними частотами і згасаннями ділянка 3 може виявитися дещо небезпечнішою.

Висновки. Основною причиною руйнування будівель і споруд під час землетрусів є їхня реакція на сейсмічні коливання ґрунту, що виникають в їх основі. Тому прогноз і моделювання поведінки ґрунтів під час землетрусів на конкретних ділянках завжди були ключовим завданням сейсмостійкого проектування і будівництва та набувають ще більшого значення з появою нових, досконаліших чисельних методів. Оцінено параметри реакції суміжних ділянок на території Києва на сейсмічні впливи різного спектрального складу амплітудою

від 0,01 г до 0,06 г з огляду на особливості складу ґрунтів. Розрахунки виконано з використанням еквівалентного лінійного моделювання сейсмічної реакції ґрунту із застосуванням як вхідних 26 реальних акселерограм сейсмічних рухів з максимальною амплітудою від 0,01 г до 0,06 г.

Отримано результати для кожної досліджуваної ділянки у вигляді графіків зміни з глибиною пікової деформації і пікового прискорення ґрунту PGA, а також прогнозних (очікуваних) амплітудних спектрів Фур'є сейсмічних коливань верхнього шару ґрунтової товщі та спектрів реакції на сейсмічні впливи одиничних осциляторів з 5%-ним згасанням. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів, згідно з яким для оцінювання потенційної небезпеки, спричиненої коливаннями ґрунту під час землетрусів, недостатньо одного параметра пікового прискорення сейсмічних коливань. Прогнозні характеристики коливань ґрунту слід розглядати з урахуванням азимутального і часового розподілу коливань, розподілу коливань з глибиною, типу хвиль, частотного складу, тривалості та ін.

Результати досліджень можна використовувати при вирішенні як методологічних, так і практичних завдань сейсмостійкого проектування та будівництва.

Список літератури

- 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.
- ДБН В.1.1-12:2014 «Будівництво в сейсмічних районах України». Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 110 с.
- ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 63 с.
- Aki, K., & Richards, P. (1980). *Quantitative seismology: Theory and methods*. San Francisco: Freeman and Company, 557 p.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 1865—1894. <https://doi.org/10.1785/BSSA07306A1865>.
- Chen, K. C., Chiu, J. M., & Yang, Y. T. (1996). Shear Wave Velocity of Sedimentary Basin in the Upper Mississippi Embayment Using S-to-P Converted Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(3), 848—856. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860030848>.
- Darragh, R. B., & Shakal, A. F. (1991). The Site Response of Two Rock and Soil Station Pairs

- to Strong and Weak Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(5), 1885–1899. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810051885>.
- Idriss, I. M., & Seed, H. B. (1968). Seismic response of horizontal soil layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 94(4), 1003–1031. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001163>.
- Kavazanjian, E., Jr Matasovic, N., Hadj-Hamou, T. & Sabatini, P. J. (1997). *Geotechnical Earthquake Engineering for Highways, 1. Design Principles, Geotechnical Engineering Circular No 3*. US Federal Highway Administration. Retrieved from <https://vulcanhammer.net.files.wordpress.com/2017/01/009759.pdf>.
- Kenzera, O., & Semenova, Y. (2020). Seismic zoning of Kyiv in physical parameters of soil oscillations. *Geodynamics*, (2), 97–106. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.097>.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New York: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., & Seed, H. B. (1972). *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EERC 72-12*. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Suyehiro, K. A. (1926). Seismic Vibration Analyser and the Records Obtained Therewith. *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo*, (1), 59–64.
- Wood, H. O. (1908). *Distribution of apparent intensity in San Francisco, in The California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission* (pp. 220–245). Carnegie Inst. Washington Pub. 87, Washington, D.C.

Seismic response of various sites of the territory of Kyiv to seismic loads

O. V. Kendzera, Yu. V. Semenova, 2021

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The research presented in the work aims to assess the seismic response of three different taxonomic sites, identified by the method of engineering and geological analogies within the territory of Kyiv, to seismic loads with different spectral content and peak amplitude from 0.01 g to 0.06 g. Assessment of the influence of local soil conditions on the intensity of earthquakes is an important task of earthquake-resistant design and construction. The soil layer at the base of the study site acts as a filter on seismic vibrations. It amplifies or attenuates the amplitude of the seismic wave propagating from the bedrock to the free surface. The paper considers the mechanisms of the possible amplification of seismic motions by various soil complexes and methods for calculating the seismic response to seismic loads of various intensities. As an analytical tool for analyzing the response of the taxonomic areas to seismic vibrations (seismic response), an equivalent linear analysis was used, which is comprehensively studied and widely used in engineering seismology. For the selected sites, models of soil strata were built, and graphs of changes with depth of peak shear strain and peak ground acceleration (PGA) were calculated, as well as predicted (expected with a given probability of non-exceeding) amplitude Fourier spectra of seismic motions in the upper layer and the response spectra of single oscillators with 5 % attenuation to seismic effects with a maximum amplitude from 0.01 g to 0.06 g. A comparative analysis of the change in the value of these parameters in individual sections of Kyiv is presented. It is shown that to assess the potential hazard from seismic ground motions during earthquakes, it is necessary to use the maximum number of design parameters that characterize the seismic hazard of specific areas and which are used to determine

the seismic resistance of buildings and structures. The most complete seismic hazard for calculating the seismic stability of objects is set by the full vector of seismic motions deployed in time: calculated accelerograms, seismograms and velocigrams. The presented calculation results are planned to be used in solving methodological and practical problems of earthquake protection, which can be realized in different parts of the territory of Kyiv.

Key words: seismic ground response analysis, response spectrum, Fourier amplitude spectrum, peak ground acceleration, peak ground shear strain.

References

- National standard DSTU-B-B.1.1-28: 2010 «Protection against dangerous geological processes, harmful operational impacts, fire. Seismic intensity scale». (2010). Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 78 p. (in Ukrainian).
- SBC B.1.1-12:2014. Building in seismic region of Ukraine. (2014). Kyiv: Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 110 p. (in Ukrainian).
- SBC A.2.1-1-2014. Engineering Surveys for Buildings. (2014). Kyiv: Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 63 p. (in Ukrainian).
- Aki, K., & Richards, P. (1980). *Quantitative seismology: Theory and methods*. San Francisco: Freeman and Company, 557 p.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, 1865—1894. <https://doi.org/10.1785/BSSA07306A1865>.
- Chen, K. C., Chiu, J. M., & Yang, Y. T. (1996). Shear Wave Velocity of Sedimentary Basin in the Upper Mississippi Embayment Using S-to-P Converted Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(3), 848—856. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860030848>.
- Darragh, R. B., & Shakal, A. F. (1991). The Site Response of Two Rock and Soil Station Pairs to Strong and Weak Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(5), 1885—1899. <https://doi.org/10.1785/BSSA0810051885>.
- Idriss, I. M., & Seed, H. B. (1968). Seismic response of horizontal soil layers. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, 94(4), 1003—1031. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001163>.
- Kavazanjian, E., Jr Matasovic, N., Hadj-Hamou, T. & Sabatini, P. J. (1997). *Geotechnical Earthquake Engineering for Highways, 1. Design Principles, Geotechnical Engineering Circular No 3*. US Federal Highway Administration. Retrieved from <https://vulcanhammer.net.files.wordpress.com/2017/01/009759.pdf>.
- Kendzera, O., & Semenova, Y. (2020). Seismic zoning of Kyiv in physical parameters of soil oscillations. *Geodynamics*, (2), 97—106. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.02.097>.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New York: Prentice Hall, Upper Saddle River, 672 p.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., & Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer pro-gram for earthquake response analysis of horizontally layered sites. *Report No. EERC 72-12*. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 102 p.
- Suyehiro, K. A (1926). Seismic Vibration Analyser and the Records Obtained Therewit. *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo*, (1), 59—64.
- Wood, H. O. (1908). *Distribution of apparent intensity in San Francisco, in The California earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission* (pp. 220—245). Carnegie Inst. Washington Pub. 87, Washington, D.C.

Сейсмическая реакция различных по строению участков территории Киева на сейсмические нагрузки

А. В. Кендзера, Ю. В. Семенова, 2021

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

Цель исследований, представленных в работе, — оценка сейсмической реакции трех различных таксонометрических участков, выделенных методом инженерно-геологических аналогий в пределах территории Киева, на сейсмические нагрузки с различным спектральным составом и максимальной амплитудой от 0,01 g до 0,06 g. Оценка влияния местных грунтовых условий на интенсивность проявления землетрясений — важная задача сейсмостойкого проектирования и строительства. Грунтовая толща в основе исследуемой площадки действует на сейсмические колебания как фильтр. Она усиливает или ослабляет амплитуду сейсмической волны, распространяющейся от коренных пород к свободной поверхности. Рассмотрены механизмы возможного усиления сейсмических колебаний различными грунтовыми комплексами и методы расчета сейсмической реакции на сейсмические нагрузки различной интенсивности. В качестве аналитического инструмента для анализа реакции исследуемых таксонометрических участков на сейсмические колебания (сейсмической реакции) применен эквивалентный линейный анализ, который всесторонне изучен и широко используется в практике инженерной сейсмологии. Для выделенных участков построены модели грунтовых толщ и рассчитаны графики изменения с глубиной пиковой оползневой деформации (pick shear strain) и пикового ускорения грунта PGA (pick ground acceleration), а также прогнозные (ожидаемые с заданной вероятностью не превышения) амплитудные спектры Фурье сейсмических колебаний в верхнем слое и спектры реакции единичных осцилляторов с 5%-м затуханием на сейсмические воздействия с максимальной амплитудой от 0,01 g до 0,06 g. Приведены результаты сравнительного анализа изменения величины указанных параметров на отдельных участках Киева. Показано, что для оценки потенциальной опасности от сейсмических колебаний грунта при землетрясениях необходимо использовать максимальное количество расчетных параметров, которыми характеризуют сейсмическую опасность конкретных участков и которые применяют для определения сейсмостойкости зданий и сооружений. Наиболее полно сейсмическую опасность для расчета сейсмостойкости объектов задают развернутым во времени полным вектором сейсмических колебаний: расчетными акселерограммами, сейсмограммами и велосиграмами. Представленные результаты расчетов планируется использовать при решении методологических и практических задач защиты от землетрясений, способных реализоваться на разных участках территории Киева.

Ключевые слова: анализ сейсмической реакции почвы, спектр реакции, амплитудный спектр Фурье, пиковое ускорение почвы, пиковая сдвиговая деформация почвы.