

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна

СЕМЕНОВА ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 550.34.01+550.347+550.34.09+550.343.4

**ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ КОЛИВАНЬ ҐРУНТІВ В ЗАДАЧАХ СЕЙСМІЧНОГО
РАЙОНУВАННЯ**

04.00.22 - геофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ - 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Верпаховська Олександра Олегівна,
провідний науковий співробітник
Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Стародуб Юрій Петрович,
професор, професор кафедри цивільного захисту і
комп'ютерного моделювання екогеофізичних процесів
Львівського державного університету безпеки
життєдіяльності

доктор фізико-математичних наук,
Маслов Борис Петрович,
головний науковий співробітник
відділу механіки повзучості Інституту механіки
ім. С.П. Тимошенка НАН України

доктор геологічних наук, доцент,
Лісний Георгій Дмитрович,
радник генерального директора ТОВ «ГЕОЮНІТ»

Захист відбудеться «30» вересня 2021 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.200.01 при Інституті геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України за
адресою:

03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32

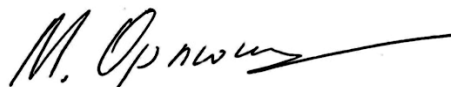
Факс: (044) 450-25-20

E-mail: rada-igph@igph.kiev.ua

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту геофізики
ім. С. І. Субботіна НАН України за адресою: 03680, м. Київ-142, пр-т Палладіна, 32
та на електронному ресурсі: <http://www.igph.kiev.ua>

Автореферат розісланий « 19 » серпня 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
доктор геологічних наук



М.І. Орлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 вибіркочому 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 прогностні 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 проекту 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 фондових 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 прийнятну типову класифікацію, узгоджену з рекомендаціями МАГАТЕ, для аналізу

сейсмічної реакції ґрунтових комплексів, характерних майданчикам 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 врахуванням 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 методу побудови математичних моделей шаруватої ґрунтової товщі, яка відповідає вимогам МАГАТЕ і враховує нелінійне деформування ґрунту. Це такі об'єкти, як: Ташлицька гідроакумулююча 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, симпозіумах 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність роботи, формулюється мета та основні завдання дослідження, вказується наукова новизна отриманих результатів, їх практичне застосування та особистий внесок здобувача. Подано загальну структуру дисертації, зв'язок з науковими темами. Наведено дані про апробацію результатів.

У першому розділі «Стан проблеми оцінки параметрів коливань ґрунтів у задачах сейсмічного районування» аналізується розвиток досліджень впливу місцевих ґрунтів на сейсмічний ефект та формування сучасних принципів оцінки параметрів коливань ґрунтової основи. Аналізуються та порівнюються методи розрахунку фізичних параметрів коливань ґрунту в практиці сейсмічного мікрорайонування України та інших країн (США, Китай, Канада, країни Європи і ін.). Згідно з ДБН В.1.1-12:2014 (Будівництво,...2014), розрахунки споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу слід виконувати із використанням спектрального, прямого динамічного або нелінійного статичного методу. При використанні спектрального методу розрахунку на сейсмічні впливи згідно ДБН В.1.1-12:2014 (Будівництво,...2014) розрахункове значення

$S_{ki} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot S_{0ki}$, де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що враховують непружні деформації та локальні пошкодження елементів будівлі (споруди), тип і призначення будівлі (споруди) і 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 $S_{0ki} = Q_k \cdot a_0 \cdot k_{zp} \cdot \beta_i \cdot \eta_{ki}$, де Q_k – навантаження, що відповідає масі, прийнятій у якості зосередженої у точці k ; a_0 – розрахункова амплітуда прискорення ґрунтової основи (згідно з ДБН В.1.1-12:2014 визначається залежно від сполучень розрахункової сейсмічної інтенсивності в балах за шкалою відповідно до ДСТУ Б В.1.1-28 на картах А і В загального сейсмічного районування території України ЗСР-2004); k_{zp} – коефіцієнт, що враховує нелінійне деформування ґрунтів (визначається за табличними даними відповідно до категорії ґрунту і сейсмічності майданчика будівництва 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; η_{ki} – коефіцієнт, що залежить від форми власних коливань будівлі або споруди і від місця розташування навантаження.

Таким чином, параметри 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. У розділі обґрунтовується некоректність такого підходу в спектральному методі розрахунку до переходу від інтенсивності сейсмічних коливань в балах і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями до фізичних параметрів коливань ґрунту. 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. Основні параметри моделей шаруватих ґрунтових товщ наведено в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1. 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 2. Параметри сейсмогеологічної моделі №2 ґрунтової товщі, складеної ґрунтами II категорії за сейсмічними властивостями

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

Розраховано частотні характеристики наведених моделей, амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту та спектри реакції з 5%-ним згасанням. Результати представлені на рис. 1. Обидві моделі зондувались одним вхідним сейсмічним впливом з максимальною амплітудою 0,06g ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

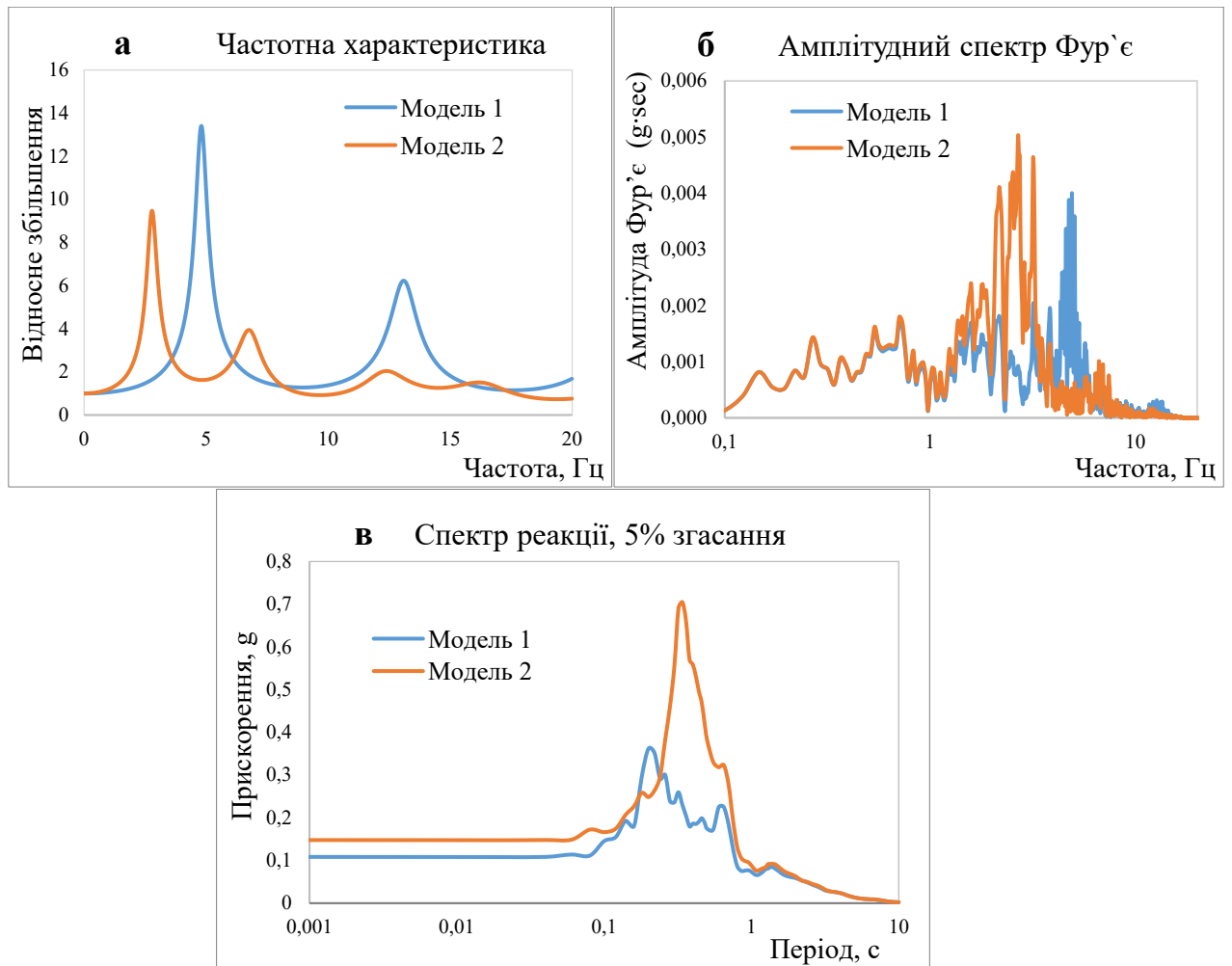


Рис. 1 Параметри сейсмічних коливань моделей №1 та №2: а– частотні характеристики; б– амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту; в– спектри реакції системи осциляторів з 5%-ним згасанням.

На рис. 1 показано, 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 у 2 рази. При використанні рекомендованого ДБН В.1.1-12:2014 табличного переходу від категорії ґрунту до фізичних параметрів коливань ґрунту амплітудний рівень коливань ґрунту вільної поверхні двох моделей буде однаковим. Таким чином, використання лише категорії ґрунту при визначенні коефіцієнтів, що враховують нелінійне деформування ґрунту при сейсмічних навантаженнях та спектрального коефіцієнта динамічності є недостатнім [Кендзера, Семенова, 2019]. 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 дає змогу перейти до обґрунтованого принципово нового опису взаємозв'язку властивостей ґрунту і фізичних параметрів сейсмічної небезпеки в методах розрахунку споруд на сейсмостійкість з використанням безперервних (не дискретних) величин.

У другому розділі «*Параметри сейсмічних коливань ґрунту для інженерних розрахунків при сейсмостійкому проектуванні та будівництві*» розглянуто широкий спектр фізичних параметрів сейсмічних коливань ґрунту і їх використання в задачах сейсмічного районування. Аналіз сейсмічної небезпеки та розробка проектних (прогнозних) сейсмічних коливань ґрунту значною мірою опираються на фізичні параметри сейсмічних коливань. 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) та частотний склад. Коливання ґрунту з високими піковими прискореннями зазвичай вважаються більш руйнівними ніж з меншими, однак дуже високі пікові прискорення 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. Таким чином, необхідно комплексно оцінювати потенціал небезпеки сейсмічних коливань в основі будівлі і визначати як амплітудний так і спектральний склад коливань. Часто, як грубе наближення до опису частотного складу коливання ґрунту використовується переважаючий період.

Згідно з Додатком В будівельних норм України (Будівництво, ...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:

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

або

$$T_0 = \frac{4H_s}{V_s^{cp}}, \quad V_s^{cp} = \frac{\sum_{k=1}^n H_k}{\sum_{k=1}^n \frac{H_k}{V_{sk}}},$$

де H_s – загальна потужність неоднорідної багатошарової 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 -го шару; $h_k = \sum_{i=1}^k H_i$ ($h_0 = 0, h_n = H_s$); n – кількість шарів.

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

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

де

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

де ρ і G – щільність і модуль зсуву кожного шару, відповідно, а нижні індекси вказують номери шарів з відліком від поверхні ґрунтової товщі.

Зазвичай переважаючі періоди, розраховані за наведеними формулами, часто переоцінюють фактичний переважаючий період в кілька разів. Це видно з рис. 2, де порівнюються переважаючі періоди, розраховані за рівняннями з періодами T_s , отриманими за даними теоретичних частотних характеристик (Yoshida, 2015).

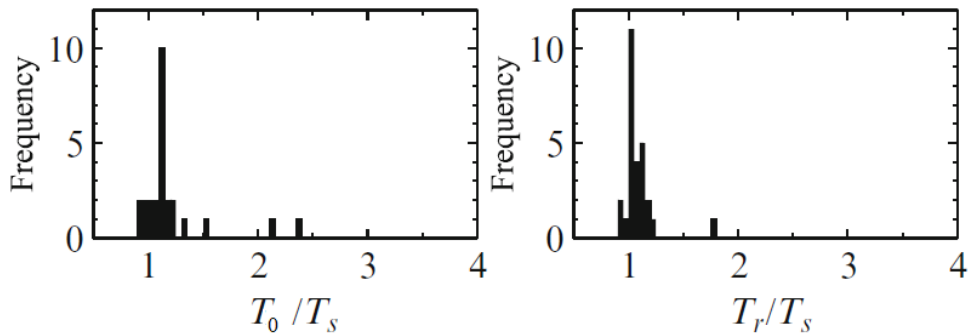


Рис. 2 Порівняння переважаючих періодів, отриманих різними методами.

Переважаючий період або частота коливання, розрахований за амплітудними спектрами Фур'є, є також грубим наближенням до опису частотного складу коливання, оскільки однакові значення можуть спостерігатись в спектрах Фур'є з кардинально різним частотним складом.

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. Для повного опису і спектрального аналізу сейсмічних коливань шаруватого 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): $S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt = A(\omega) - iB(\omega)$, 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 $B(\omega)$:

$$|S(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)}, \quad \text{де} \quad A(\omega) = \int_0^t f(t) \cos \omega t dt,$$

$$B(\omega) = \int_0^t f(t) \sin \omega t dt.$$

Повна енергія сигналу $f(t)$, згідно з теоремою Парсеваля, визначається як інтеграл квадрата модуля його амплітудного спектра:

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

енергетичний спектр або спектральна густина 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, зазвичай вимагає, щоб сейсмічне збурення було близьким до стаціонарного процесу, що має місце лише для центральної частини запису землетрусу (інтенсивного коливання). Використання при інженерних розрахунках спектрів реакції не має цього обмеження. 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.

Спектри реакції необхідні для визначення сейсмічних сил і вони є найбільш точною мірою інтенсивності сейсмічного впливу на конструкцію.

Для чисельного розв'язку задачі розрахунку спектра реакції вирішується диференціальне рівняння сейсмічних коливань системи з одним ступенем свободи

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + c\dot{y} + ky &= -m\ddot{y}_0, \text{ або} \\ \ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \omega^2 y &= -\ddot{y}_0(t), \end{aligned} \quad (1)$$

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 прямує 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 (1), 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:

$$\begin{aligned} y(t) &= -\frac{1}{\omega} \int_{\tau=0}^t \ddot{y}_0(\tau) \exp[-\omega\xi(t-\tau)] \sin \omega(t-\tau) d\tau = \\ &= -[a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \end{aligned} \quad (2)$$

де

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

Диференціюючи рівняння (1) визначимо швидкість руху маси відносно основи:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= -\omega[a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] - \xi\omega[a(t) \sin \omega_1 t - b(t) \cos \omega_1 t] = \\ &= -\int_0^t \ddot{y}_0(\tau) \exp[-\xi\omega(t-\tau)] \cos \omega_1(t-\tau) d\tau + \xi\omega y(t) \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) &= -\omega^2 y(t) - 2\xi\omega\dot{y} = \omega^2 (1 + 2\xi^2) [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] + \\ &+ 2\xi\omega^2 [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] \end{aligned} \quad (4)$$

Спектри максимальних відносних переміщень, швидкостей і прискорень маси системи з одним ступенем свободи, отримані з (2)–(4), відповідно записуються

$$D(\xi, \omega) = \left| [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \right|_{\max_t}, \quad (5)$$

$$V(\xi, \omega) = \left| \omega [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] + \xi\omega [a(t) \sin \omega_1 t - b(t) \cos \omega_1 t] \right|_{\max_t}, \quad (6)$$

$$A(\xi, \omega) = \left| \begin{array}{l} \omega^2 (1 - 2\xi^2) [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] + \\ + \xi \omega^2 [a(t) \cos \omega t - b(t) \sin \omega t] \end{array} \right|_{\max}, \quad (7)$$

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:

$$a(\omega) = \sum (t - 2\Delta\tau) + \frac{\Delta\tau}{6} \left[\begin{array}{l} \ddot{y}_0(t - 2\Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - 2\Delta\tau)] \cdot \cos \omega(t - 2\Delta\tau) + \\ + 4\ddot{y}_0(t - \Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - \Delta\tau)] \cdot \cos \omega(t - \Delta\tau) + \\ + \ddot{y}_0(t) \cdot \exp(-\xi\omega t) \cos \omega(t) \end{array} \right], \quad (8)$$

$$b(\omega) = \sum (t - 2\Delta\tau) + \frac{\Delta\tau}{6} \left[\begin{array}{l} \ddot{y}_0(t - 2\Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - 2\Delta\tau)] \cdot \sin \omega(t - 2\Delta\tau) + \\ + 4\ddot{y}_0(t - \Delta\tau) \cdot \exp[-\xi\omega(t - \Delta\tau)] \cdot \sin \omega(t - \Delta\tau) + \\ + \ddot{y}_0(t) \cdot \exp(-\xi\omega t) \cdot \sin \omega(t) \end{array} \right], \quad (9)$$

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 (5) - (7) можемо побудувати спектральні криві реакції переміщень, швидкостей і прискорень на сейсмічне навантаження. У практиці інженерної сейсмології переважно використовуються спектри псевдошвидкості і псевдоприскорень, що визначаються формулами

$$\tilde{V}(\xi, \omega) = \omega D(\xi, \omega) = \left| \omega [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \right|_{\max}, \quad (10)$$

$$\tilde{A}(\xi, \omega) = \omega^2 D(\xi, \omega) = \left| \omega^2 [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \right|_{\max}. \quad (11)$$

Таким чином, спектри реакції характеризують поведінку реальної системи з одним ступенем свободи з певним періодом і згасанням та визначають значення реакції цієї системи на сейсмічні навантаження. Концепція спектрів максимальних реакцій на сейсмічні навантаження використовується практично у всіх нормативних документах різних країн.

Водночас у розділі обґрунтовується, що описати сейсмічне коливання одним параметром може бути доречним лише в одиничних випадках. Для адекватного та коректного опису важливих характеристик конкретного сейсмічного коливання ґрунту і визначення його потенціалу сейсмічної небезпеки для конкретної споруди 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.

У третьому розділі «Теоретичні основи аналізу сейсмічної реакції ґрунту» розглянуто теоретичні основи методів аналізу сейсмічної реакції шаруватого ґрунту в задачах інженерної сейсмології. 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 проекту 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 моделі шаруватої ґрунтової товщі від корінної породи до вільної поверхні. Задача поширення сейсмічної хвилі вирішується шляхом кількісної оцінки впливу місцевих (локальних) ґрунтових шарів 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 розповсюджуються тільки вертикально. Ці припущення пояснюються тим фактом, що властивості ґрунту зазвичай змінюються швидше у вертикальному напрямку, ніж в горизонтальному.

Одновимірний аналіз сейсмічної реакції ґрунту виконується з використанням: лінійного, еквівалентного лінійного або нелінійного методів моделювання (Kramer, 1996). При використанні лінійного або еквівалентно лінійного методу хвильове рівняння вирішується в частотній області. У нелінійному методі використовуються нелінійні гістерезисні моделі ґрунту, хвильове рівняння вирішується в часовій області з використанням чисельного інтегрування. 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.

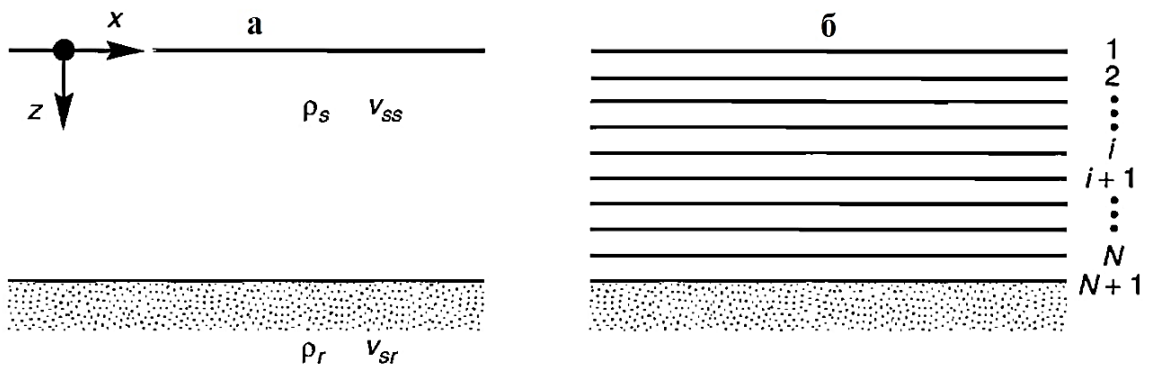


Рис. 3 Сукупність однорідних ґрунтових шарів нескінченної горизонтальної протяжності, що покривають корінні породи (а); дискретизація ґрунтової товщі на N шарів (б).

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

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} \quad (12)$$

Для представлення методу явних кінцевих різниць, розглянемо функцію $f(x)$, показану на рис.4.

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

$$\frac{\partial f(\tilde{x})}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(\tilde{x} + \Delta x) - f(\tilde{x})}{\Delta x} \quad (13)$$

Доцільне наближення до першої похідної можна отримати, знявши граничні обмеження і використовуючи невелике, але кінцеве значення Δx . Таким чином, вираз рівняння (13) є наближенням прямої різниці для $df(\tilde{x})/dx$. Рис. 4 показує, що пряма різниця фактично забезпечує краще наближення до похідної при $x = \tilde{x} + \Delta x/2$, ніж при $x = \tilde{x}$.

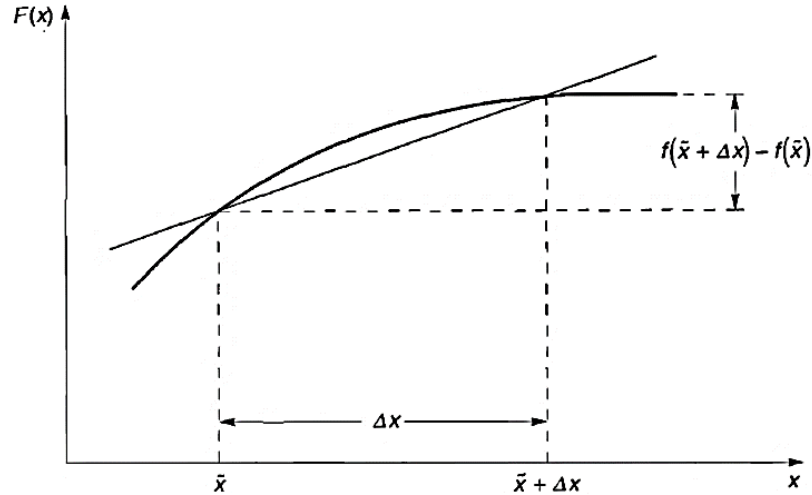


Рис. 4 Наближення прямої різниці $f'(\tilde{x})$, задане нахилом прямої, яка перетинає функцію в точках $x = \tilde{x}$ і $x = \tilde{x} + \Delta x$. Наближення стає точним при $\Delta x \rightarrow 0$.

Розділивши ґрунтову товщу на N шарів потужністю Δz (рис. 3, б) і рухаючись у 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:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{\dot{u}_{i,t+\Delta t} - \dot{u}_{i,t}}{\Delta t}. \quad (15)$$

Підстановка рівнянь (14) і (15) у рівняння руху дає змогу апроксимувати диференціальне рівняння явним кінцево-різницеvim рівнянням:

$$\frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}}{\Delta z} = \rho \frac{\dot{u}_{i,t+\Delta t} - \dot{u}_{i,t}}{\Delta t}. \quad (16)$$

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

$$\dot{u}_{i,t+\Delta t} = \dot{u}_{i,t} + \frac{\Delta t}{\rho \Delta z} (\tau_{i+1,t} - \tau_{i,t}). \quad (17)$$

Рівняння (17) показує, як умови в момент часу t можна використовувати для визначення умов в момент часу $t+\Delta t$. Використовуючи рівняння (17) 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 (17) дає змогу 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 $\tau_1=0$, отримаємо

$$\dot{u}_{i,t+\Delta t} = \dot{u}_{i,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z} \tau_{2,t}. \quad (18)$$

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 у верхній частині шару корінної породи $\tau_{r,t}$. Таким чином

$$\dot{u}_{N+1,t+\Delta t} = \dot{u}_{N+1,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z} (\tau_{r,t} - \tau_{N,t}). \quad (19)$$

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 з (Joyner and Chen, 1975), як

$$\tau_{r,t} \approx \rho_r v_{sr} (2\dot{u}_r(t + \Delta t) - \dot{u}_{N+1,t+\Delta t}). \quad (20)$$

Підставивши рівняння (20) у рівняння (19), отримаємо

$$\dot{u}_{N+1,t+\Delta t} = \frac{\dot{u}_{N+1,t} + \frac{\Delta t}{\rho\Delta z} [2\rho_r v_{sr} \dot{u}_r(t + \Delta t) - \tau_{N,t}]}{1 + (\Delta t / \rho\Delta z) \rho_r v_{sr}}. \quad (21)$$

Після того, як встановлено граничні умови, 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 $\dot{u}_N, \dot{u}_{N-1}, \dot{u}_{N-2}, \dots$ всі будуть приймати значення, відмінні від нуля, у міру того, як ґрунтові шари переміщуються, реагуючи на вхідний рух. Додаткове зміщення на кожному часовому кроці визначається виразом

$$\Delta u_{i,t} = \dot{u}_{i,t} \cdot \Delta t. \quad (22)$$

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

$$\gamma_{i,t} = \frac{\partial u_{i,t}}{\partial z} \approx \frac{u_{i+1,t} - u_{i,t}}{\Delta z}. \quad (23)$$

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).

У лінійному методі чисельного моделювання 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 навантаженні ґрунту. Таким чином, еквівалентний лінійний і нелінійний методи для врахування нелінійності вимагають вибору відповідних кривих динамічних властивостей ґрунту для досліджуваних ґрунтових шарів. Оскільки ґрунт проявляє нелінійну поведінку, навіть при дуже малих деформаціях, лінійний метод вже майже не застосовується при аналізі сейсмічної реакції ґрунту. Широкого практичного застосування набули еквівалентний лінійний та нелінійний методи. Верифікаційні дослідження показали, що обидва методи дають подібні результати при відносно невеликих значеннях амплітуди зсувної деформації ґрунту. Нелінійний метод може більш точно моделювати реакцію шаруватої товщі, складеної м'якими сейсмічно слабкими ґрунтами, здатними до розрідження при інтенсивних сейсмічних впливах.

Реальний ґрунт являє собою складний матеріал, який веде себе нелінійно і часто демонструє залежну від часу поведінку при сейсмічному навантаженні, змінне в часі напруження, 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.

Графік залежності «напруження–деформація» ґрунту в умовах циклічного навантаження відображає петлю гістерезису, показану на рис.5.

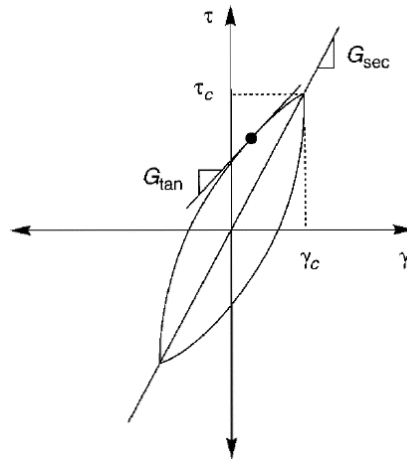


Рис. 5 Січний модуль зсуву G_{sec} і дотичний (тангенціальний) модуль зсуву G_{tan} .

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 $G_{sec} = \tau_c / \gamma_c$, 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 бути зручно 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 використовують при еквівалентному лінійному аналізі сейсмічної реакції ґрунту для опису його поведінки. Інші типи аналізів для врахування нелінійної залежності напруження–деформація вимагають фактичного шляху петлі гістерезису, що описується циклічною нелінійною або вдосконаленою конститутивною моделлю (Kramer, 1996).

В інженерному застосуванні значна увага приділяється дослідженням характеру зменшення модуля зсуву G і збільшення коефіцієнта поглинання D зі збільшенням амплітуди зсувної деформації для різних типів ґрунтів. Визначення модуля зсуву і значення коефіцієнта поглинання сумісні з деформаціями в 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 G/G_{max} , використовуючи поліноміальний вираз. У роботі

(Hardin, Drnevich, 1972) запропоновано визначати криву збільшення коефіцієнта поглинання з використанням наступного рівняння:

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

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

У приведеній моделі поглинаючих властивостей ґрунту не враховується вплив показника пластичності (I_p), хоча це досить важливий параметр, який 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 залежно від I_p та геологічного віку (Zhang et al., 2005).

Згідно з вимогами МАГАТЕ, для виконання надійного і реалістичного аналізу сейсмічної реакції, характерної для досліджуваного майданчика, залежну від деформації зміну властивостей ґрунтового матеріалу необхідно задавати типовими даними у правильному співвідношенні з типовою класифікацією ґрунтів. За результатами аналізу даних інженерно-геологічних вишукувальних робіт, попередньо проведених на майданчиках перед комплексом робіт з сейсмічного мікрорайонування, та результатами тестів динамічних випробувань ґрунтів, викладених в численних роботах, виділено показники характеристики ґрунту для встановлення відповідності класифікаціям ґрунтів прийнятих МАГАТЕ. До основних показників при визначенні зміни нелінійних параметрів ґрунту зі збільшенням деформації кожного ґрунтового шару віднесено: геологічний вік, глибина залягання, глибина залягання відносно відмітки рівня ґрунтових вод тощо.

У четвертому розділі «Трансформація сейсмічних хвиль в шаруватій ґрунтовій товщі» розглянуто механізми трансформації сейсмічних хвиль при поширенні у шаруватій ґрунтовій товщі. Аналіз поширення сейсмічних хвиль в реальних умовах шаруватої ґрунтової товщі необхідний для обґрунтування вибору ідеалізованої моделі поведінки ґрунту, коли всі особливості не можуть бути детально описані і необхідно дослідити загальну поведінку хвиль на границях.

Характеристики поширення сейсмічних хвиль на шляху від розлому до корінної породи і на шляху від інженерного сейсмічного шару до вільної поверхні 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.

Це явище відоме як згасання сейсмічних хвиль. Такого згасання не відбувається, коли хвиля поширюється в одному напрямку, працюють різні механізми, і в результаті відбувається як підсилення, так і ослаблення сейсмічного коливання, зміна спектрального складу.

Реальні 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 трансформації хвилі), а й свої властивості, причому ці процеси тісно пов'язані між собою.

У розділі відмічаються три основні механізми: підсилення сейсмічних коливань внаслідок переходу сейсмічних хвиль у верхні шари з меншими значеннями сейсмічних жорсткостей; резонансні підсилення коливань, які виникають, коли частота коливань сейсмічної хвилі співпадає з частотою власних коливань ґрунтових відкладів; нелінійність взаємозв'язку між напруженням і деформацією ґрунтових шарів, що призводить зазвичай, 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 найчастіше є підсилення слабких сейсмічних коливань в ґрунтах і ослаблення сильних (Yoshida, 2015). 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- або 3-мірна, тобто є горизонтальні неоднорідності, наприклад, варіації потужності осадових басейнів, резонансні явища також спостерігаються для поверхневих хвиль, що розвиваються на таких неоднорідностях. У розділі наведено приклади підсилення та послаблення сейсмічних коливань приповерхневими ґрунтами.

Представлено результати досліджень впливу зміни окремих параметрів ґрунтової товщі (зокрема, вологості, ущільнення наявного в розрізі піску та оголення ґрунтової товщі до корінної породи). Результати дослідження впливу фактору ущільнення намивного піску з плином часу на спектральні характеристики ґрунтового середовища під будівельним майданчиком показали, що ґрунтові умови під будівництвом, складені свіжонамивними пісками, будуть покращуються в сейсмічному відношенні [Семенова, 2021a]. Про це свідчить зменшення ширини частотного діапазону резонансного підсилення ґрунтами сейсмічних коливань та зміщення резонансних частот у більш високочастотну область. Збільшення вологості прискорює пониження міцності ґрунту при сейсмічному навантаженні. Це можна пояснити послабленням структурних зв'язків і збільшенням рухливості частинок в міру потовщення їх гідратних оболонок, а отже, і зменшенням згасання коливань у ґрунтовому матеріалі при збільшенні його вологості до критичного рівня, вище якого вихідна міцність системи 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).

На рис. 6 представлено приклад розрахованих частотних характеристик ґрунтової товщі території Бортницької станції аерації з різними показниками вологості w піску та суглинків, що зустрічаються в ґрунтовому розрізі.

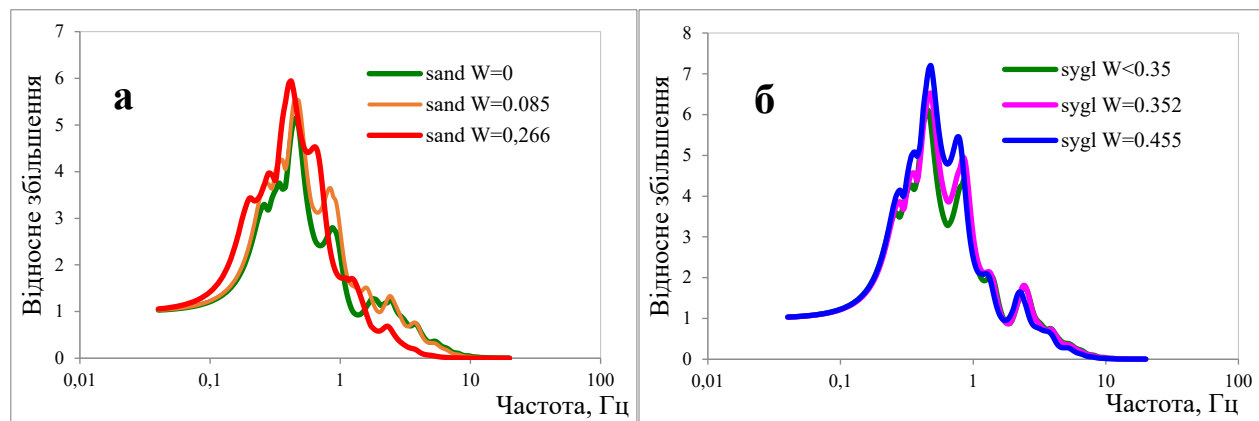


Рис. 6 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі території Бортницької станції аерації складених: а – пісками різної вологості; б – суглинками різної вологості.

Дослідження впливу зміни вологості моделей реальної ґрунтової товщі на трансформацію сейсмічних коливань, показали, що зі збільшенням вологості ґрунту спектр коливань стає більш низькочастотним. З рис. 6 видно, що розширення спектральної області зі збільшенням вологості є більш чутливим для пісків порівняно з глинистими ґрунтами. Спостерігається тенденція зменшення несучої здатності піску, погіршення сейсмічних властивостей зі збільшенням вологості, і вплив вологості на таку динаміку збільшується зі зменшенням крупності піску. 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 може переходити з твердого стану (твердої консистенції) в пластичний (тістоподібний), а потім і в текучий, тобто набуває властивості в'язкої рідини. Такі переходи супроводжуються різким падінням несучої здатності ґрунту. Ймовірність виникнення цих переходів та їх швидкість залежить від інтенсивності сейсмічного навантаження. На рис. 6 видно, що при збільшенні вологості глинистого ґрунту проявляється розширення спектральної області підсилення коливань і зміщення резонансних частот. Відмітимо, що на рис. 6 представлено частотні характеристики ґрунтової товщі, складеної суглинками з реальною (в невеликих межах) змінною вологістю, які зустрічаються в інженерно-геологічному розрізі території Бортницької станції аерації. При суттєвому збільшенні показників вологості ґрунту зміна параметрів частотної характеристика буде суттєво збільшуватись.

Результати експерименту з чисельного аналізу сейсмічної реакції ґрунтової товщі (на прикладі території розміщення основних споруд Ташлицької ГЕС) на максимально можливі сейсмічні впливи з умовним зняттям у розрахунковій моделі

осадових порід показали, що значний за товщиною осадовий шар за рахунок прояву нелінійності може значно понизити значення спектральних прискорень по всій ширині спектра, як, наприклад у випадку інженерно-геологічного району I (рис. 7). У випадку моделі інженерно-геологічного району II зняття осадового шару, призвело до істотного збільшення спектральних прискорень в діапазоні низьких періодів та зменшення в діапазоні високих. Спостерігається перекачування енергії в більш високочастотну область із звуженням спектрального піку.

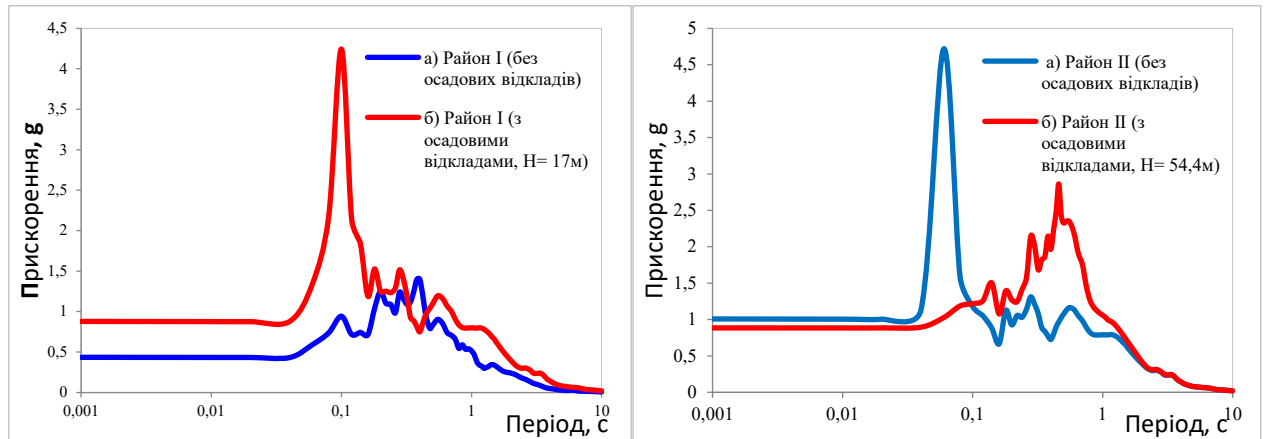


Рис. 7 Обвідні сукупності спектрів реакції системи осциляторів (із 5%-ним згасанням) на акселерограми з різною амплітудою, якими моделюються коливання ґрунту інженерно-геологічних районів №I та №II Ташлицької ГАЕС у випадках: а – ґрунтова товща без осадових відкладів (умовне оголення до метаморфічних гірських порід); б – з осадовими відкладами.

Таким чином, для конструкцій з низькими частотами власних коливань сейсмічні показники ґрунту покращились, а для конструкцій з власними коливаннями близькими 10 Гц погіршилися. Тому 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 проєктованого об'єкту. Це дасть змогу встановити доцільність (або її відсутність) зняття осадового шару для покращення сейсмічних умов майданчика. Незначна зміна параметрів осадового шару може суттєво вплинути на спектральний склад і величину сейсмічних коливань.

У п'ятому розділі «Сейсмічне зонування Києва в фізичних параметрах коливань ґрунту» обґрунтовується необхідність удосконалення методики сейсмічного районування (зонування) у фізичних параметрах коливань ґрунту та пропонується алгоритм аналітично-емпіричного підходу, який реалізовано на прикладі території Києва. 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.

В період 1960–2000 рр. переважна більшість країн перейшла до сейсмічного районування у фізичних параметрах коливань ґрунту: в пікових прискореннях ґрунту (Європа, Японія, Китай) або в рівнях спектрів реакції (США, Канада), оскільки

використання проєктувальниками саме цих параметрів для забезпечення сейсмостійкості будівель та споруд є коректним та обґрунтованим, у порівнянні з використанням несистемних одиниць – балів сейсмічної інтенсивності.

На першому етапі сейсмічного зонування в межах території Києва методом сейсмогеологічних аналогій виділено таксонометричні ділянки, на яких сейсмічний ефект може суттєво відрізнятися. Для виділення вказаних ділянок (фізичного районування) було використано геологічну карту четвертинних відкладів, дочетвертинних відкладів, геологічну карту кристалічного фундаменту та схему структурно-геоморфологічного районування території Києва. Дані отримано з каталогу фонду ДНВП "Геоінформ України" (Державна..., 2001). На рис. 8 представлена карта таксонометричних ділянок території Києва.

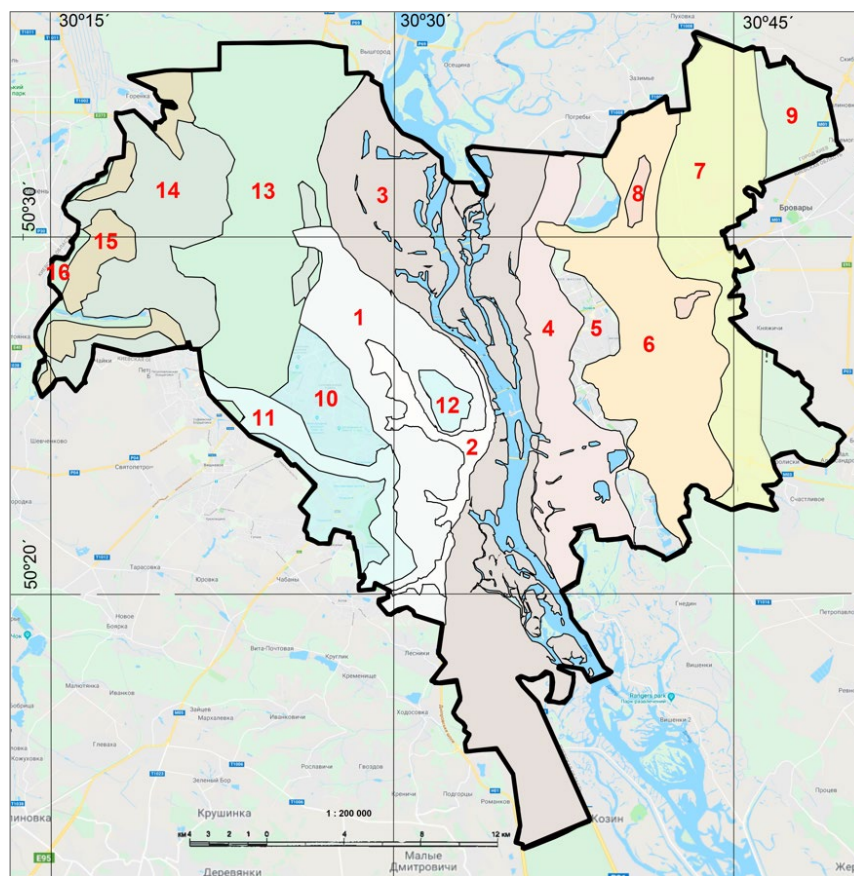


Рис. 8 Карта таксонометричних ділянок (№1–16), виділених методом сейсмогеологічних аналогій в межах території Києва.

Для кожної зони побудовано розрахункову сейсмогеологічну модель з нелінійними деформаційно-залежними параметрами, які дають змогу врахувати виникнення нелінійних ефектів в ґрунтах при сейсмічних навантаженнях.

З використанням чисельного еквівалентно-лінійного моделювання сейсмічної реакції розрахункових сейсмогеологічних моделей шаруватого ґрунту визначено їх частотні характеристики й амплітудний і спектральний склад на вільній поверхні кожної таксонометричної ділянки Києва. В якості вхідних рухів відібрано 26 сейсмічних впливів з різною максимальною амплітудою до $0,06g$, різним спектральним складом та різної тривалості. На рис. 9 представлено розраховані

амплітудно-частотні характеристики сейсмогеологічних моделей ґрунтового середовища 16 таксонометричних ділянок, виділених в межах Києва, та усереднена частотна характеристика. Остання розраховувалась як функція розподілу середніх значень коефіцієнта спектрального підсилення сейсмічних коливань всіх таксонометричних ділянок по частоті. Рис. 9 демонструє, що розраховані частотні характеристики мають схожу форму, спостерігається зміщення максимумів по частоті. 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 до 0,8 Гц.

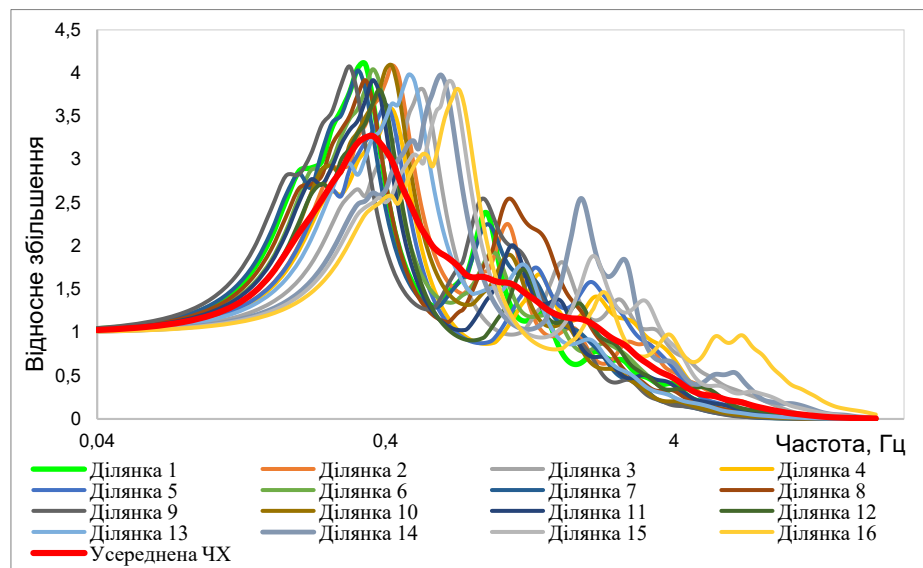


Рис. 9 Амплітудно-частотні характеристики моделей ґрунтового середовища таксонометричних ділянок території Києва та усереднена частотна характеристика для ґрунтових умов Києва.

Для кожної амплітудно-частотної характеристики розраховано інтегральні спектральні підсилення. Під інтегральним спектральним підсиленням в даному випадку приймається площа під спектральною функцією. 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 наступному кроці для кожної зони було розраховано коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення [Кендзера, Семенова, 2021a]. Вони розраховувались шляхом ділення інтегрального спектрального підсилення кожної таксонометричної ділянки на середнє інтегральне підсилення, тобто усередненої амплітудно-частотної характеристики для ґрунтових умов території Києва. На рис. 10 представлено побудовану карту розподілу коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва. Карта дає розподіл по території міста кількісної оцінки впливу спектральних характеристик ґрунтових умов на сейсмічну небезпеку, виражену системними фізичними величинами.

Розраховані за запропонованою 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. 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 [Кендзера, Семенова, 2021б]. Карта розподілу коефіцієнта інтегрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва (рис. 10) 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.

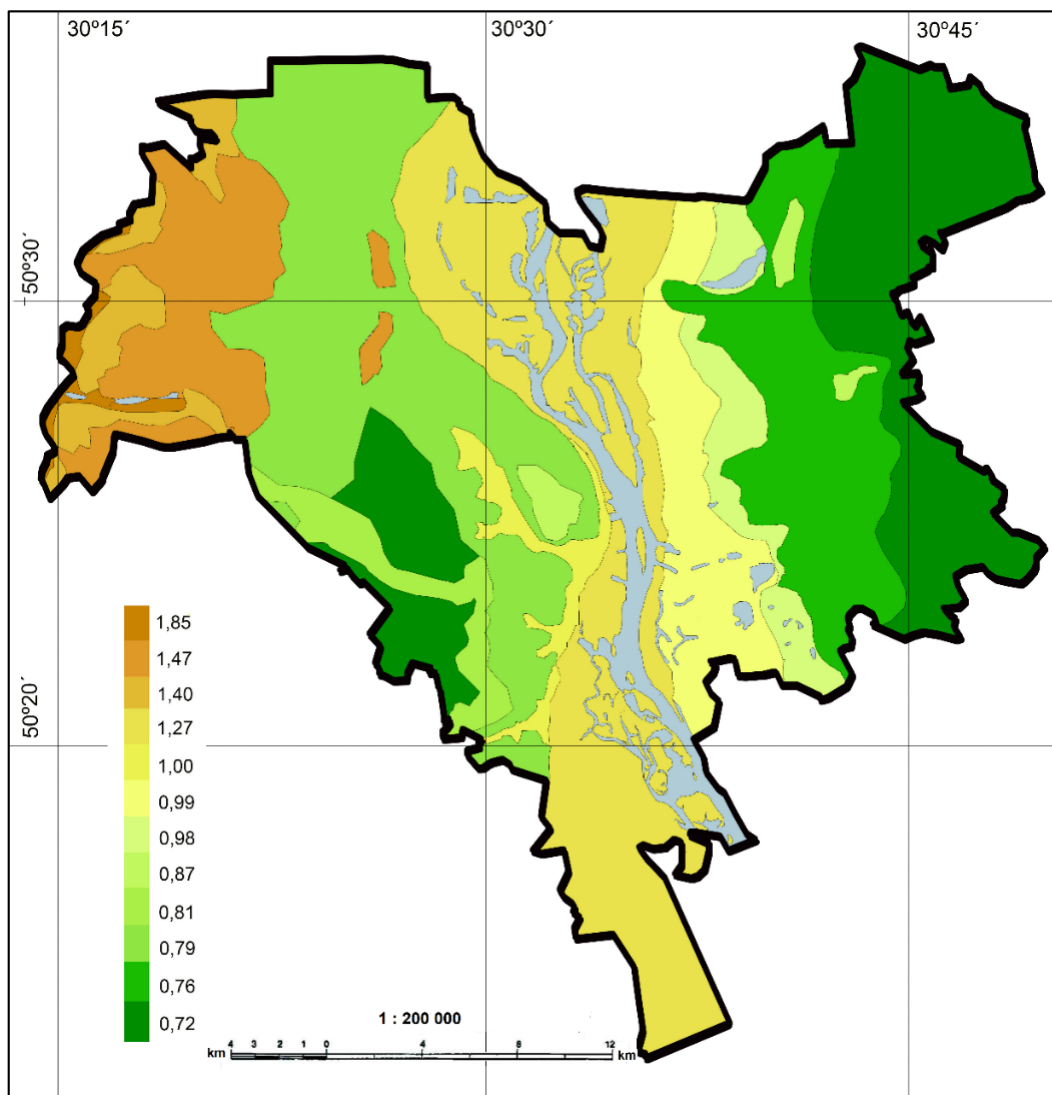


Рис. 10 Карта розподілу коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення ґрунтами сейсмічних коливань для території Києва.

Розраховані поправочні ґрунтові коефіцієнти враховують потужність осадової товщі, контрастність сейсмічних жорсткостей між шарами ґрунтової товщі, нелінійні властивості ґрунтів та фільтруючі властивості ґрунтової товщі щодо сейсмічних коливань. В цьому є перевага застосування запропонованих у роботі поправочних коефіцієнтів порівняно з тими, що пропонуються в державних будівельних нормах (Будівництво, ...2014) для застосування спектрального метода розрахунку споруд на сейсмічні впливи.

У задачах оцінки потенціалу сейсмічної небезпеки досліджуваної території важливим кроком є ідентифікація та кількісне визначення сейсмічно «слабких» шарів, в яких можуть виникати прогресуючі нелінійні ефекти. Для 16 таксонометричних ділянок, виділених в межах Києва, розраховано зміну з глибиною по мірі поширення сейсмічних коливань від корінних порід до вільної поверхні таких параметрів, як пікова зсувна деформація, коефіцієнт поглинання, пікове прискорення ґрунту. На рис. 11 як приклад представлено графіки зміни пікової зсувної деформації та коефіцієнта поглинання з глибиною при зондуванні моделі ділянки № 1 сейсмічними коливаннями, що імітують 26 вхідних рухів з різним спектральним складом та максимальною амплітудою від 0,01g до 0,06g.

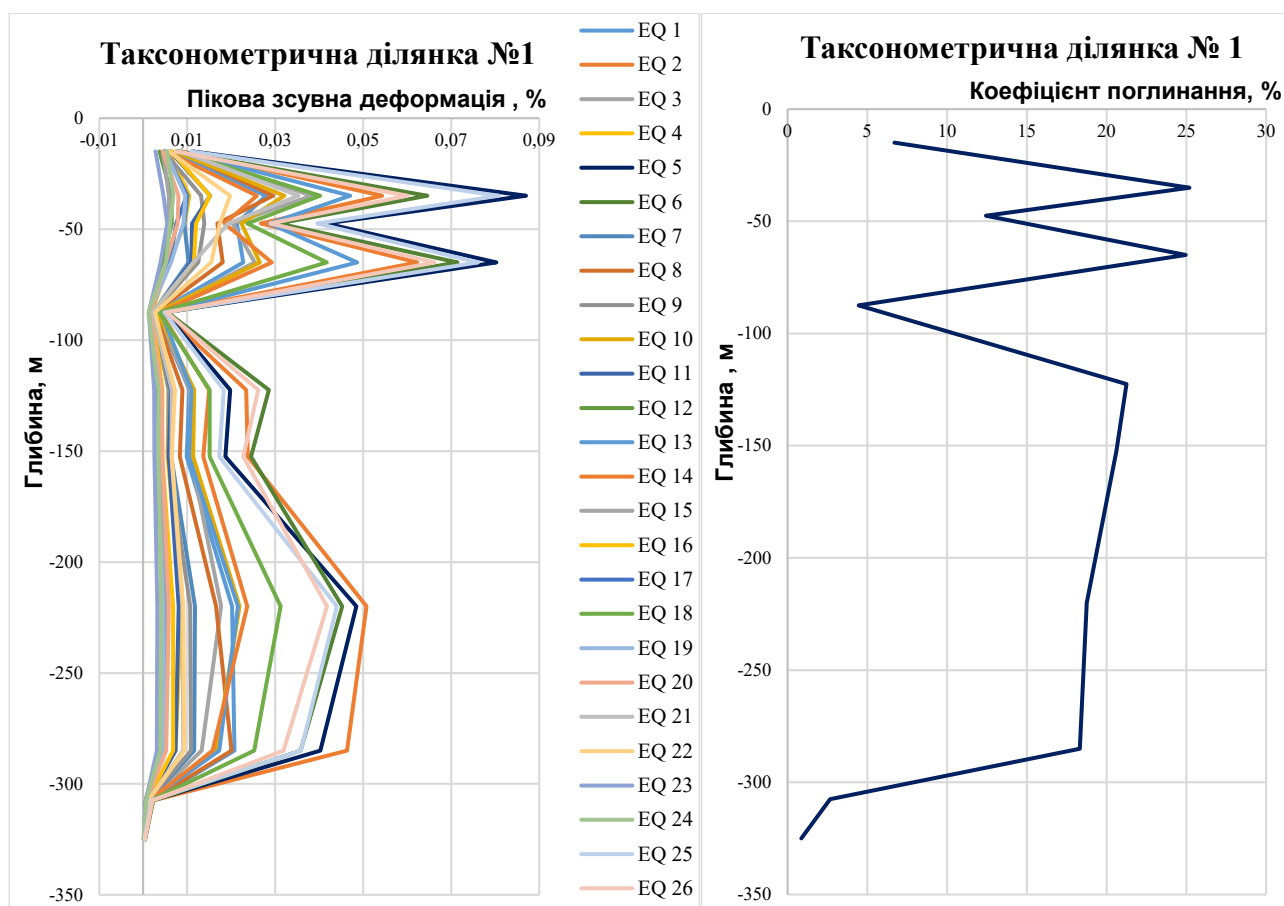


Рис. 11 Графіки зміни пікової зсувної деформації з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 1 (а); зміна максимального коефіцієнта поглинання D з глибиною в моделі таксонометричної ділянки № 1 при зондуванні 26 вхідними сейсмічними рухами з максимальною амплітудою від 0,01g до 0,06g (б).

В якості сейсмічно слабких шарів в моделях таксонометричних ділянок № 1, 2, № 6–9, проявились: 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 більшій амплітуді сейсмічного впливу ніж 0,06g, можливо будуть спостерігатись піки зсувної деформації. Таким чином, виділено ділянки на території Києва, в розрізах яких в приповерхневому заляганні містяться ґрунти, здатні до нелінійних проявів більшою мірою ніж на інших ділянках, і цей прояв прямо пропорційний величині падаючого сейсмічного впливу.

Для кожної ділянки розраховано пікові прискорення PGA, пікові швидкості PGV і пікові зміщення PGD (таблиця 3).

Таблиця 3. Розраховані значення пікових прискорень PGA, пікових швидкостей PGV і пікових зміщень PGD для таксонометричних ділянок Києва.

Таксонометрична ділянка	PGA, g	PGV, м/с	PGD, м
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.12 представлено побудовану карту розподілу розрахункових пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні ґрунтової товщі території Києва при максимальних прогнозованих сейсмічних впливах до 0,06g. Карту сейсмічного районування Києва в PGA рекомендовано використовувати в інженерних цілях додатково з розрахованими амплітудними спектрами Фур'є прискорень ґрунту.

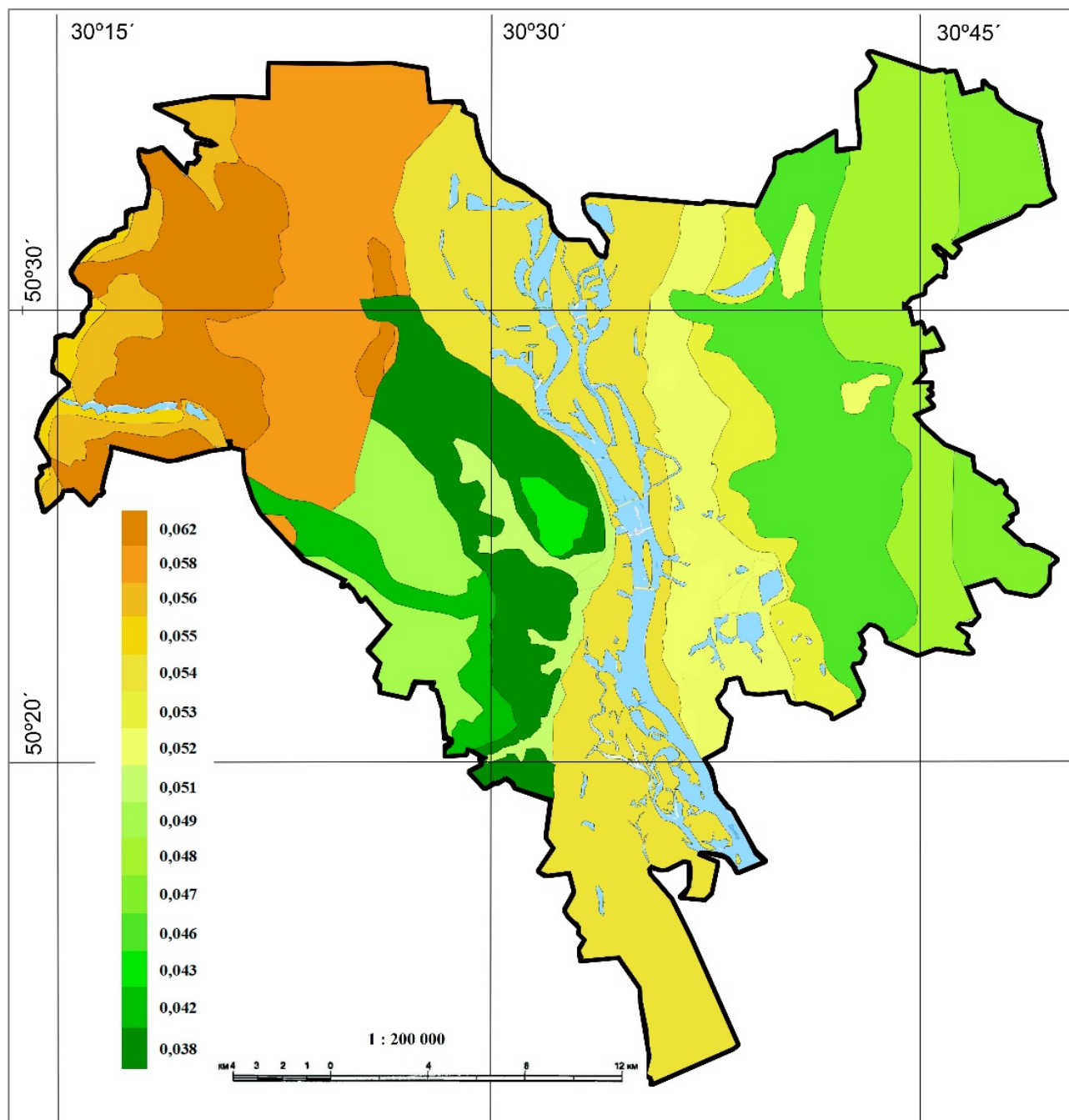


Рис. 12 Карта розподілу розрахункових пікових прискорень ґрунту PGA на вільній поверхні території Києва при максимальних сейсмічних впливах до 0,06g.

З рис. 12 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 районування території Києва в результаті виділено 15 ділянок. Найвищі значення PGA відповідають таксонометричним ділянкам №13–16. Для того, щоб оцінити частотний склад PGA розраховано амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту. На рис. 13 представлено, як приклад, амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту, розраховані в результаті зондування 26-ма сейсмічними впливами таксонометричних ділянок № 13–14.

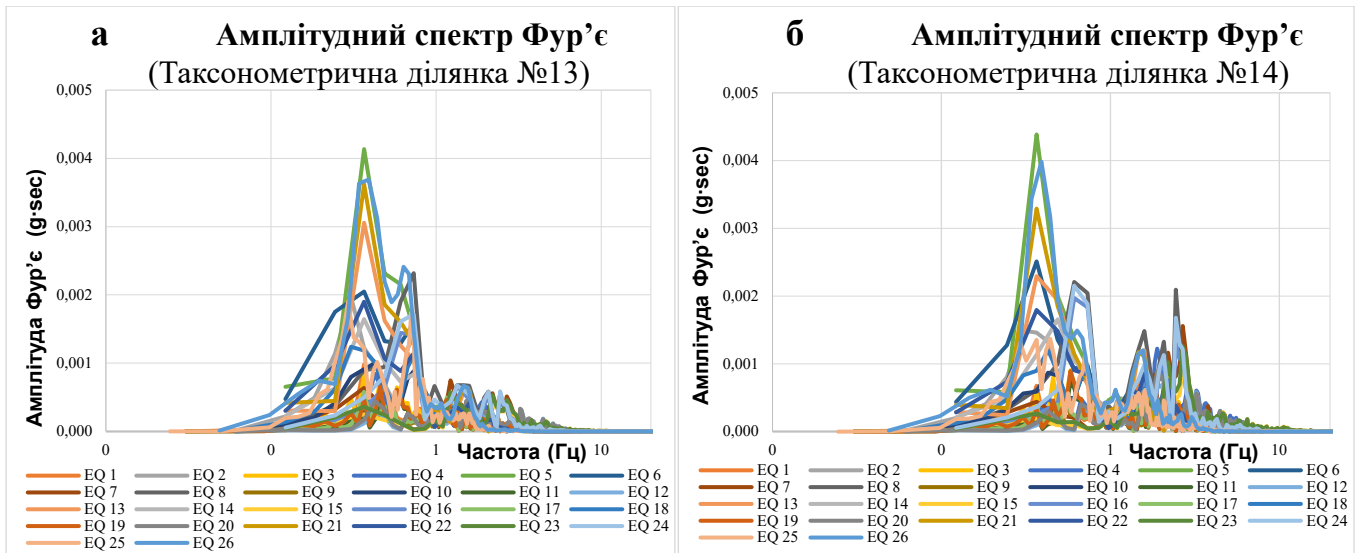


Рис. 13 Амплітудний спектр Фур'є прискорень ґрунту, розрахований в результаті зондування 26 сейсмічними впливами: таксонометричної ділянки № 13 (а); таксонометричної ділянки № 14 (б).

Більша частина енергії сейсмічних коливань в амплітудних спектрах Фур'є прискорень ґрунту таксонометричних ділянок №13–16 відповідає частотному діапазону від 0,24 до 0,85 Гц.

На рис. 14 представлено розраховані для таксонометричних ділянок Києва спектри реакції системи осциляторів з 5%-ним згасанням на 26 сейсмічних впливів, заданих акселерограмами.

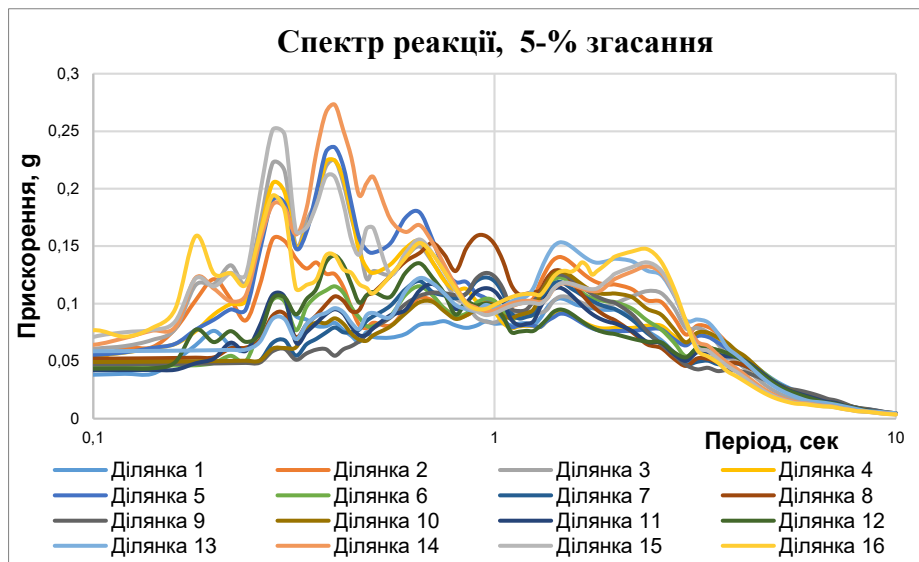


Рис. 14 Спектри реакції системи осциляторів з 5%-ним згасанням, розраховані для таксонометричних ділянок № 1 -16.

Видно, що розходження більше спостерігається по амплітуді, порівняно з шириною спектра. Для кожного спектра реакції розраховано площу підспектральної області методом Сімпсона. Встановлено сильну пряму кореляцію між значеннями спектрального прискорення і площею підспектральної області та слабку зворотну між абсолютною шириною спектра і площею підспектральної області. Коефіцієнт

кореляції між значеннями спектрального прискорення і площею підспектральної області складає 0,94. Спектри реакції таксонометричних ділянок Києва за результатами кореляційного аналізу порівнювались за рівнем спектрального прискорення. Найбільшими значеннями спектрального прискорення характеризуються таксонометричні ділянки № 3–5, № 14–16. Проте оцінити, яка з ділянок характеризується «гіршими» умовами з сейсмічної точки зору, можна лише для конкретного об'єкта. 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, 4, 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.

У шостому розділі «Сейсмічна реакція сейсмогеологічних моделей ґрунтів в основі відповідальних споруд» наведено результати впровадження розробленої дисертантом методики побудови математичних моделей шаруватого ґрунту з нелінійними параметрами, залежними від рівня деформації, та алгоритму розрахунку нелінійної сейсмічної реакції шаруватого ґрунту при уточненні кількісних параметрів сейсмічної небезпеки ряду відповідальних споруд України (Ташлицької ГАЕС, Середньодніпровської ГЕС, Южно-Української АЕС, Запорізької АЕС, компресорної станції «Яготин», Канівської ГЕС). Чисельний аналіз сейсмічної реакції моделей шаруватого ґрунту на сейсмічні впливи виконано із застосуванням еквівалентної лінійної моделі з використанням програмного забезпечення ProShake (ProShake..., 1998).

На рис. 15 приведено розраховані частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1 та №2 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС.

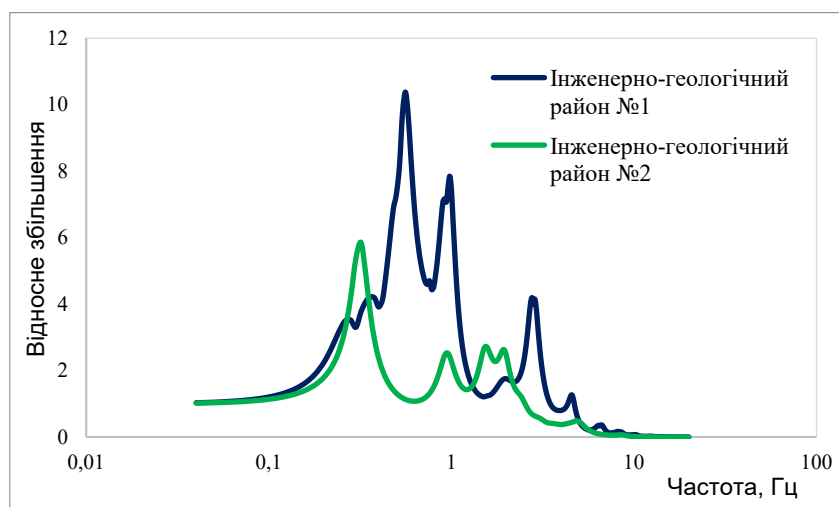


Рис. 15 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1, №2 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС.

Частотна характеристика ґрунтового середовища інженерно-геологічного району №1 території розміщення основних споруд Канівської ГЕС характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення сейсмічних коливань місцевими ґрунтами від 0,26 до 3,02 Гц. Найбільші підсилення сейсмічних коливань ґрунтами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись у 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 сейсмічних коливань локальними ґрунтами від 0,22 до 2,08 Гц. Найбільші підсилення коливань ґрунтами досліджуваної ділянки можуть спостерігатись у частотному діапазоні від 0,26 до 0,38 Гц з коефіцієнтом підсилення сейсмічних коливань 5,86.

На рис. 16 представлено амплітудні спектри Фур'є коливань ґрунту на поверхні двох інженерно-геологічних районів території Канівської ГЕС, розраховані за максимальними значеннями спектрів Фур'є на поверхні 26 вхідних сейсмічних рухів з різною амплітудою та спектральним складом.

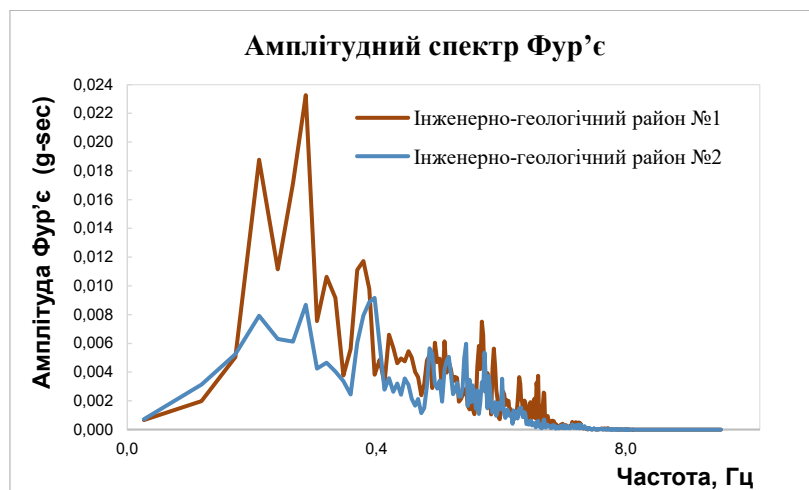


Рис. 16 Максимальні амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту інженерно-геологічних районів №1 і №2 території Канівської ГЕС, розраховані для 26 вхідних сейсмічних рухів.

Амплітудні спектри Фур'є прискорень ґрунту демонструють різницю сейсмічної реакції вільної поверхні двох інженерно-геологічних районів в межах території Канівської ГЕС. Максимальні амплітудні значення спектру Фур'є коливань прискорень 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 у сейсмічному відношенні порівняно з інженерно-геологічним районом №2.

На рис. 17 приведено розраховані амплітудно-частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1 (правобережна гребля), №2 (будівля ГЕС, водозливна гребля) та №3 (лівобережна гребля) території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС.

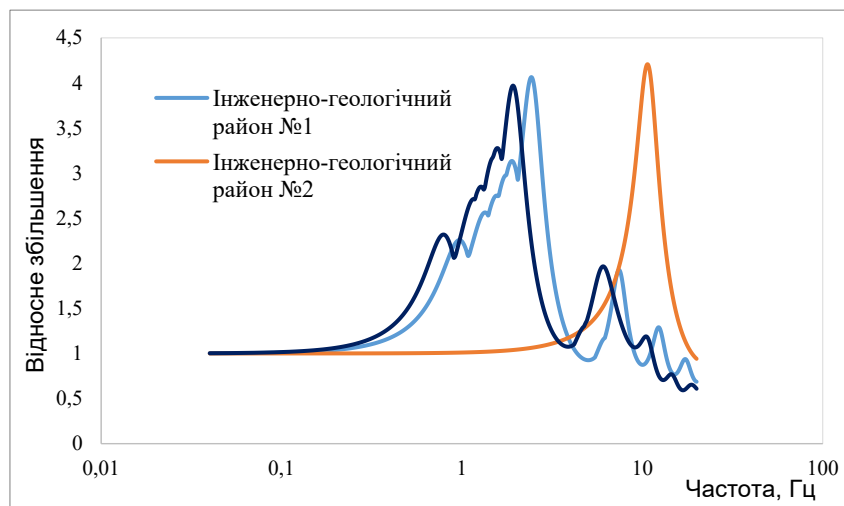


Рис. 17 Частотні характеристики моделей ґрунтової товщі інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 території розміщення основних споруд Середньодніпровської ГЕС.

Видно, що інженерно-геологічний район №2 території Середньодніпровської ГЕС характеризується вибіркоким підсиленням сейсмічних коливань ґрунтами в більш високочастотному діапазоні (від 7,72 до 13,58 Гц) порівняно з резонансними частотними діапазонами інженерно-геологічних районів №1 та №3. Частотна характеристика інженерно-геологічного району №1 характеризується частотним діапазоном вибіркового підсилення коливань ґрунтами від 0,82 до 3,12 Гц, а інженерно-геологічного району №3 від 0,72 до 2,42 Гц. Коефіцієнти підсилення амплітудно-частотних характеристик всіх трьох інженерно-геологічних районів майже однакові (біля 4). Оскільки амплітуда падаючої сейсмічної хвилі зазвичай вища в більш низькочастотних діапазонах, тому інженерно-геологічні райони №1 та №3 можна вважати більш сейсмічно небезпечними порівняно з інженерно-геологічним районом №2.

На рис. 18 представлено розраховані амплітудно-частотні характеристики моделей шаруватого ґрунту трьох інженерно-геологічних районів території розміщення основних відповідальних споруд Южно-Української АЕС.

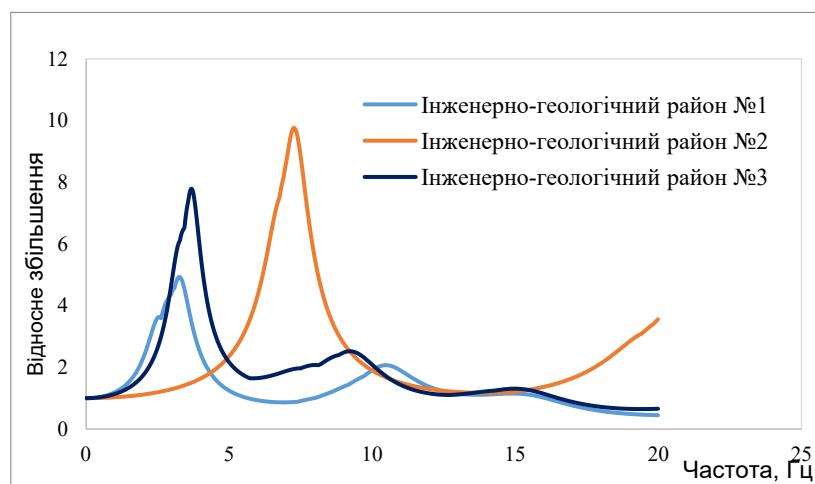


Рис. 18 Частотні характеристики інженерно-геологічних районів №1, №2 та №3 території розміщення основних споруд Южно-Української АЕС.

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. Частотна характеристика 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. Частотна характеристика 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 порівняно з районами №2 і №3.

Аналізуючи розраховані частотні характеристики, можна побачити, що вони відрізняються залежно 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 у розрізі ґрунтової товщі інженерно-геологічного району №2 є найменшою. Потужність осадових відкладів району №2 становить 8,5 м, а району №1–14 м, а району №3 – 16,5 м. У розрізі ґрунтової товщі території Южно-Української АЕС глибина залягання корінних порід змінюється досить різко. Це призводить до зміщення резонансних максимумів у широкому діапазоні частот. Інженерно-геологічний район №1 відрізняється від району №3 більш низькими значеннями швидкостей поширення 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 результати використано для оцінки сейсмічної небезпеки основних споруд відповідальних об'єктів з метою забезпечення інженерної, експлуатаційної, радіаційної та іншої безпеки.

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 ґрунтів через запропоновані в роботі поправочні ґрунтові коефіцієнти, які враховують фільтруючі властивості ґрунтової товщі і механізми трансформації сейсмічних хвиль у ній. Перехід необхідний для покращення і більш ефективного та обґрунтованого застосування методів розрахунку споруд на аварійне сполучення навантажень з урахуванням сейсмічного впливу. Алгоритм розрахунку поправочних ґрунтових коефіцієнтів реалізовано на прикладі території Києва.

2. З використанням чисельного моделювання досліджено вплив зміни окремих параметрів ґрунтової товщі (зокрема, вологості, ущільнення піску та умовне зняття осадового шару, тобто оголення ґрунтової товщі до корінної породи) на спектральні характеристики її коливань. За результатами аналізу сейсмічної реакції моделей шаруватого ґрунту встановлено, 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. 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.

3. Теоретично обґрунтовано та впроваджено в практику сейсмічного районування України методику побудови математичних сейсмогеологічних моделей таксонометричних ділянок з врахуванням нелінійного деформування при сейсмічних навантаженнях.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Розраховано прогнозні (очікувані) амплітудні і спектральні параметри сейсмічних коливань шаруватого ґрунту таксонометричних ділянок Києва при прогнозованих сейсмічних впливах з максимальною амплітудою до $0,06g$.

9. 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.

10. Для таксонометричних ділянок Києва розраховано спектри реакції одиничних осциляторів з 5%-ним згасанням на 26 сейсмічних рухів, заданих акселерограмами, пронормованими по амплітуді до $0,06g$. У 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. Виділено таксонометричні ділянки, що характеризуються найбільшими значеннями спектрального прискорення.

11. Методика побудови математичних моделей шаруватої ґрунтової товщі, яка задовольняє вимогам Міжнародного агентства з атомної енергії і враховує нелінійне деформування ґрунту, впроваджена при оцінці сейсмічної небезпеки 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 небезпеки: амплітудний та спектральний склад сейсмічних коливань ґрунтів в основі відповідальних споруд.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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). Моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи для забезпечення сейсмостійкості споруд за європейськими стандартами (за матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 30 травня 2018 р.) // Вісник Національної академії наук, 7, 40-47 <https://doi.org/10.15407/visn2018.07.040>

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

9. 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.

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). 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>.

13. Kendzera 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.** (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.

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.** (2021b). 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 ґрунтами на території Києва. - Допов. Нац. акад. наук Укр., 2, 65 - 70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.11.065>.

22. **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.

23. Kendzera O.V., Mykulyak S.V., **Semenova Yu.V.**, Skurativska A. I., Skurativskyi 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.** (2021с). 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.** (2021d). 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.** (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.

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

29. **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>.

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. Верхне 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.О 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.

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 ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розвитку і вдосконаленню існуючих наукових і теоретичних основ методики сейсмічного районування у фізичних параметрах коливань ґрунту територій з недостатнім забезпеченням даними інструментальних спостережень. Методика дає змогу перейти при розрахунках споруд на сейсмостійкість від використання сейсмічної інтенсивності землетрусів в балах і категорії ґрунту за сейсмічними властивостями до фізичних параметрів прогнозованих коливань ґрунту. Нову удосконалену методику реалізовано на прикладі території Києва.

Розроблено карту розподілу коефіцієнта інтегрального спектрального підсилення сейсмічних коливань ґрунтами для території Києва. Карта дає розподіл по території кількісної оцінки впливу спектральних характеристик ґрунтових умов на сейсмічну небезпеку. Коефіцієнти інтегрального спектрального підсилення запропоновано використовувати в якості ґрунтових поправочних коефіцієнтів в

методах розрахунку будівель і споруд на сейсмостійкість для більш обґрунтованих та реалістичних оцінок.

Побудовано карту сейсмічного районування Києва в пікових прискореннях ґрунту при прогнозних сейсмічних впливах з максимальною амплітудою до 0,06g. Карту рекомендовано використовувати в інженерних цілях додатково з розрахованими амплітудними спектрами Фур'є та спектрами реакції.

Розроблено математичні моделі ґрунтової основи відповідальних споруд Ташлицької ГАЕС, Канівської ГЕС, Запорізької АЕС, Южно-Української АЕС, Середньодніпровської ГЕС, компресорної станції «Яготин» та розраховано прогнозні амплітудні і спектральні параметри коливань ґрунту.

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. - Qualifying scientific work on the rights of manuscript. Thesis for a doctor's degree in physical and mathematical sciences, specialty 04.00.22 – geophysics (103 – Earth' Sciences). – S.I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to developing and improving the existing scientific and theoretical foundations of the seismic zoning methodology in the physical parameters of soil oscillations in a territory with insufficient provision of instrumental observations. The methodology makes it possible to move in the calculations of structures for seismic resistance from the use of seismic intensity points and category soils of their seismic properties to the physical parameters of predicted ground motions. The new improved methodology was implemented on the example of the territory of Kyiv.

A map of the distribution of the coefficient of integral spectral amplification of seismic motions by soils for the territory of Kyiv has been developed. The map gives the distribution over the territory of a quantitative assessment of the influence of the spectral characteristics of soil conditions on the seismic hazard. In the methods of calculating buildings and structures for seismic resistance, for more substantiated and realistic assessments, it is proposed to use the integral spectral amplification coefficients as ground correction factors.

A map of seismic zoning of Kyiv in peak ground accelerations was built for the case of predicted seismic effects with a maximum amplitude of up to 0.06g. It is recommended to use the map for engineering purposes in addition to the calculated Fourier amplitude spectra and response spectra.

Mathematical models of the soil base of critical structures of the Tashlyk PSP, Kanivska HPP, Zaporizhzhia NPP, South-Ukrainian NPP, Srednyodniprovska HPP, Yagotin compressor station have been developed, and the predicted amplitude and spectral parameters of soil oscillations have been calculated.

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

АННОТАЦИЯ

Семенова Ю.В. Физические параметры колебаний грунтов в задачах сейсмического районирования. – Квалификационный научный труд на правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 04.00.22 – геофизика (103 – Науки о Земле). – Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена развитию и совершенствованию существующих научных и теоретических основ методики сейсмического районирования в физических параметрах прогнозируемых колебаний грунта территорий с недостаточным обеспечением данными инструментальных наблюдений. Усовершенствованная методика при расчетах сейсмических воздействий на сооружения позволяет перейти от использования сейсмической интенсивности землетрясений в баллах макросейсмической шкалы и деления грунта по категориям сейсмических свойств – к физическим параметрам прогнозируемых колебаний грунта. Использование проектировщиками территориальных амплитудных и спектральных параметров колебаний грунта в методах расчета сейсмостойкости зданий и сооружений является более корректным и обоснованным по сравнению с подходами, рекомендованными строительными нормами Украины, в рамках которых осуществляются прямой пересчет баллов сейсмической интенсивности в ускорение колебаний грунта.

Предложено использовать поправочные грунтовые коэффициенты, которые учитывают увеличение, или уменьшение, сейсмических колебаний, относительно средних для территории города, либо строительной площадки. Поправочные грунтовые коэффициенты учитывают физические параметры каждого слоя грунтовой толщи, ее реологические и фильтрационные свойства. Применение полученных в работе поправочных грунтовых коэффициентов, по сравнению с переходами от балльности и категории грунта, имеет два основных преимущества: 1) коэффициенты непрерывны, в то время как сейсмическая балльность – дискретна; 2) в коэффициентах сохранен физический смысл зависимости параметров сейсмической опасности от локального строения среды.

Разработана методика построения математических моделей слоистого грунта, которые описываются эмпирическими нелинейными параметрами, зависимыми от уровня деформации, в соответствии с принятой типовой классификацией, согласованной с требованиями МАГАТЭ и рекомендациями Eurocode-8 для более реалистического анализа сейсмической реакции исследуемых участков. Разработанная методика может использоваться для таксонометрических участков, выделенных как в пределах площадок ответственных сооружений, так и в пределах более масштабных территорий.

Усовершенствованную методику сейсмического районирования в физических параметрах колебаний грунта реализовано на примере территории Киева. В пределах

территории города методом сейсмогеологических аналогий выделено 16 таксонометрических участков, на которых прогнозируется разный сейсмический эффект. Для выделенных участков построены математические модели слоистого грунта с параметрами неупругого деформирования, которые позволяют учесть возникновения нелинейных эффектов при сейсмических нагрузках. Определены частотные характеристики каждого таксонометрического участка и усредненная частотная характеристика для грунтовых условий территории Киева. Рассчитаны территориальные амплитудные и спектральные параметры грунтов таксонометрических участков города.

Разработана карта распределения коэффициента интегрального спектрального усиления сейсмических колебаний грунтами для территории Киева. Карта дает распределение по территории города количественной оценки влияния спектральных характеристик грунтовых условий на сейсмическую опасность, выраженную системными физическими величинами. Коэффициенты интегрального спектрального усиления предложено использовать в качестве грунтовых поправочных коэффициентов в методах расчета зданий и сооружений на аварийные сейсмические нагрузки для более обоснованных и реалистичных оценок параметров сейсмической опасности. Использование для целей сейсмической защиты карты распределения коэффициента спектрального усиления по территории исследуемой площадки, вместо традиционной карты сейсмического микрорайонирования, построенной по методу инженерно-сейсмологических аналогий, исключает необходимость в дальнейшем делать искусственные переходы от внесистемной сейсмической интенсивности к физическим характеристикам прогнозируемых колебаний.

В результате численного динамического анализа распространения сейсмических колебаний в сейсмогеологических моделях таксонометрических участков Киева выделены сейсмически слабые слои в грунтовых разрезах. Выделены участки на территории Киева, в разрезах которых в приповерхностном залегании содержатся грунты подверженные нелинейным проявлениям. При этом интенсивность проявления будет прямо пропорциональна величине сейсмического воздействия.

Построена карта сейсмического районирования Киева в пиковых ускорениях грунта PGA для прогнозных сейсмических воздействий с максимальной амплитудой до 0,06g. Карту распределения PGA рекомендуется использовать в инженерных целях совместно с рассчитанными амплитудными спектрами Фурье и спектрами реакции единичных осцилляторов.

Результаты диссертационной работы внедрены при работах по оценке сейсмической опасности Ташлыкской ГАЭС, Каневской ГЭС, Запорожской АЭС, Южно-Украинской АЭС, Среднеднепровской ГЭС и компрессорной станции «Яготын». Разработаны математические модели слоистого грунта в основании перечисленных объектов и определены амплитудные и спектральные параметры колебаний грунта для территорий размещения основных ответственных сооружений.

Ключевые слова: сейсмическое районирование, параметры колебаний грунта, усиление сейсмических колебаний, динамика грунтов, моделирование сейсмического отклика грунтов, пиковые ускорения грунта.