

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

СЕМЕНОВА ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 550.34.01

**МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ГРУНТОВИХ КОМПЛЕКСІВ ПРИ СЕЙСМІЧНОМУ МІКРОРАЙОНУВАННІ**

04.00.22 - геофізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 2016

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук
Кендзера Олександр Володимирович,
Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України
Заступник директора з наукової роботи,
член-кореспондент НАН України

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Руцицький Ярема Ярославович,
завідувач відділу реології
Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка
Національної академії наук України

доктор фізико-математичних наук, професор
Стародуб Юрій Петрович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності ДСНС України,
завідувач кафедри цивільного захисту та комп'ютерного
моделювання екогеофізичних процесів, м. Львів

Захист відбудеться «10» жовтня 2016 р. о 14⁰⁰ 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

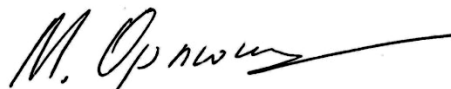
Факс: (044) 450-25-20

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 « 9 » вересня 2016 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
доктор геологічних наук



М.І. Орлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Характер і розподіл руйнувань при землетрусах в значній мірі визначається реакцією місцевих ґрунтових умов на сейсмічний вплив. Руйнівний ефект визначають спектральний склад та інтенсивність сейсмічних коливань. При сильних сейсмічних впливах поведінка ґрунтів стає нелінійною і проблема оцінки реакції ґрунту суттєво ускладнюється. В таких умовах реакція ґрунту залежить як від складу, фізичних параметрів, потужності і водонасиченості ґрунтових шарів, так і від інтенсивності землетрусу і частотного складу коливань в його джерелі та на кривлі консолідованого фундаменту під майданчиком. При інтенсивних землетрусах може спостерігатися ущільнення і просідання, розпушування і набухання рихлих ґрунтів, а в деяких випадках - розрідження водонасичених ґрунтів та інші небезпечні явища. Нелінійність реакції ґрунту призводить до суттєвої зміни форми і спектра сейсмічних коливань, що розповсюджуються в ґрунтових шарах. Резонансні частоти, на яких спостерігаються підсилення коливань ґрунтів при цьому, виявляються залежними від інтенсивності сейсмічних впливів. При інтенсивних впливах значення резонансних частот можуть помітно понизитись відносно значень, встановлених у результаті проведення інструментальних досліджень методом реєстрації слабких землетрусів, вибухів і короткоперіодних мікросейсм.

Найточніший метод визначення частотних характеристик ґрунтів потребує реєстрації максимально можливих землетрусів безпосередньо на самому майданчику. В умовах України використання цього методу є практично не реальним, у зв'язку з тим, що за короткий час, відведений для сейсмологічних досліджень під проектування, одержати записи землетрусів, в умовах слабкої і помірної сейсмічності, як правило, не вдається. Інші методи, рекомендовані чинними нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 65-87; РСН 60-86], базуються на уявленнях про лінійну поведінку ґрунтів при сейсмічних впливах. Нелінійні явища в ґрунтах на даний час не враховуються.

Зростаючі темпи і об'єми будівництва висотних будівель і важливих інженерних споруд вимагають освоєння нових територій, які за експертними оцінками часто характеризуються складними інженерно-геологічними умовами та погіршеними сейсмічними властивостями. Міста розширяються, освоюючи для забудови зазвичай території, ґрунти яких відносяться до III і IV категорій за сейсмічними властивостями, згідно ДБН В.1.1-12:2014. Такі ґрунти мають суттєві нелінійні властивості, які будуть проявлятися по-різному, в залежності від інтенсивності і частотного складу сейсмічних впливів. З огляду на це, врахування нелінійних властивостей ґрунтів є необхідним. Зазначені фактори викликають необхідність удосконалення методики визначення частотних характеристик ґрунтової товщі з врахуванням її нелінійних властивостей для територій із високою і помірною інтенсивністю прогнозованих сейсмічних впливів, до яких відноситься значна частина території України, що обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 1) 1.5.2.149, ДРН теми 0106U000913 «Розвиток теорії та методики дослідження довкілля з метою прогнозування сейсмічної небезпеки» (2006 - 2010 рр.); 2) 1.5.2.160, ДНР теми 107U0022195 «Моніторинг геофізичних полів з метою зниження ризиків від

небезпечних природних явищ на території України (2007-2011 рр.)»; 3) 1.5.2.208, III-8-11, ДНР теми 0111U000229 «Розвиток методів прогнозування сейсмічної небезпеки (2011 - 2015 рр.); 4) III-24-12 «Геофізичний моніторинг геодинамічних процесів на території України у зв'язку з вирішенням проблем екологічної та сейсмічної небезпеки». ДНР 0112U003046; 5) III-27-14 «Сейсмічні та геофізичні спостереження на платформній частині території України у 2014-2018 рр.», ДНР 0114U000231; 6) III-8-16 «Розвиток методів вивчення сейсмічності території України та оцінки параметрів сейсмічної небезпеки майданчиків важливих і екологічно небезпечних об'єктів» ДНР 0116U000130; 7) II-7-12 «Геофізичні дослідження будови і динаміки геологічного середовища для зниження небезпеки від загрозливих явищ ендегенного походження на території України та Росії», ДНР 0112U003451.

У 2016 р. автору призначено стипендію Президента України для молодих вчених.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є наукове обґрунтування, розробка та реалізація удосконаленої методики визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів з врахуванням їх нелінійних властивостей для сейсмічного мікрорайонування будівельних майданчиків України.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

1. Розвинути методику розрахунку частотних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійної поведінки при інтенсивних сейсмічних впливах. Удосконалена методика необхідна для сейсмічного мікрорайонування будівельних майданчиків на території України.
2. Встановити основні фактори, які визначають параметри амплітудно-частотної характеристики ґрунтової товщі, та дослідити закономірності їх впливу.
3. Розробити алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі для математичного еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання її реакції на сейсмічні впливи.
4. Провести порівняльний аналіз результатів розрахунку реакції ґрунтів під реальними будівельними майданчиками на сейсмічні впливи методами: лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного математичного моделювання - і встановити межі їх використання.
5. Встановити граничні допустимі значення епістемічних і випадкових похибок у параметрах розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, при яких забезпечується одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом математичного еквівалентного лінійного моделювання.
6. Застосувати та впровадити удосконалену методику розрахунку частотних характеристик ґрунтів з врахуванням їх нелінійної реакції на інтенсивні сейсмічні впливи при проектуванні, новому будівництві, реконструкції і експлуатації будівель і споруд різного призначення у сейсмічних районах України.

Об'єктом досліджень є реакція ґрунтової товщі під будівельними майданчиками на сейсмічні впливи різної інтенсивності, з урахуванням нелінійних властивостей середовища.

Предметом досліджень є методика моделювання реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками на сейсмічні впливи для задач сейсмічного мікрорайонування, сейсмостійкого проектування та будівництва

Методи досліджень. Аналіз теоретичних і практичних методів визначення реакції ґрунтів на сейсмічні впливи, вибір оптимального програмного забезпечення для моделювання сейсмічних впливів в нелінійних моделях ґрунтових комплексів, розробка алгоритмів побудови моделей ґрунтових комплексів з врахуванням нелінійних властивостей, формування бази даних про нелінійні деформаційні характеристики ґрунтів, методи математичного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи різної інтенсивності, практичне застосування розробок для побудови частотних характеристик ґрунтової товщі під реальними будівельними майданчиками в Києві і Одесі та інших сейсмічних районах країни.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано удосконалену методику визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів під будівельними майданчиками країни, яка враховує нелінійну поведінку ґрунтів при інтенсивних сейсмічних впливах. В основі методики лежить аналітично-емпіричний підхід до розрахунку частотних характеристик ґрунтів.
2. Сформовано нову базу даних, яка в графічному і цифровому вигляді містить інформацію про залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків, розташованих на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів.
3. Вперше розроблено та застосовано на практиці алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, з підбором їх деформаційних характеристик із створеної бази даних. Моделі необхідні для математичного еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи різної інтенсивності.
4. Вперше встановлено граничні значення епістемічних і випадкових похибок у параметрах розрахункових моделей ґрунтів, при яких забезпечується одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.
5. Вперше в Україні при сейсмічному мікрорайонуванні ряду будівельних та експлуатаційних майданчиків (НСК «Олімпійський», газоперекачувальних станцій газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани», гідротехнічних споруд Кременчуцької ГЕС та висотних будинків в Києві і Одеській області) впроваджено амплітудно-частотні характеристики ґрунтових товщ, побудовані з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів.

Практичне значення одержаних результатів. Розвинуті в дисертаційній роботі методи та алгоритми дозволяють на сучасному рівні вирішувати важливу наукову і практичну проблему визначення (прогнозування) кількісних характеристик сейсмічної небезпеки на будівельних і експлуатаційних майданчиках для цілей сейсмостійкого проектування важливих об'єктів. Вирішено задачу побудови частотних характеристик ґрунтових комплексів під досліджуваними майданчиками шляхом їх теоретичного розрахунку з врахуванням нелінійної поведінки геологічного середовища під дією інтенсивних сейсмічних впливів.

Показано, що чисельне вирішення нелінійних задач сейсмології на сучасному рівні знань, вимагає врахування даних польових та лабораторних досліджень, якими встановлено експериментальні кореляційні зв'язки між напруженнями і деформаціями з врахуванням літологічного складу, фізико-механічних параметрів, глибини залягання, величини і тривалості додаткових сейсмологічних навантажень.

Нові теоретичні та методичні розробки автора мають достатні фізико-математичні та інженерно-геологічні обґрунтування. З їх використанням розраховано «аналітично-емпіричні» частотні характеристики ґрунтових комплексів з врахуванням нелінійних властивостей ґрунтів під будівельними майданчиками. Розвинуту автором методику впроваджено при сейсмостійкому проектуванні таких об'єктів, як: НСК «Олімпійський», газоперекачувальні станції газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани», гідротехнічні споруди Кременчуцької ГЕС, ряд висотних будинків в м. Києві та в Одеській області.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, результати та висновки дисертації, що виносяться на захист, одержані автором самостійно та ґрунтуються на його особистих дослідженнях. В роботах, виконаних у співавторстві, дисертанту належить програмний супровід [1,2,6,8-12], розрахунки частотних характеристик ґрунтів [1,2,6,8-12], аналіз результатів та формулювання висновків [2,3,4,5].

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані на різних етапах роботи, були представлені на наукових конференціях: IX міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів», (Київ, 2009); XVI міжнародна конференція «Свойства, структура, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы», (Воронеж, 2010); Наукова конференція-семінар «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», (Львів, 2012); 5-та міжнародна наукова конференція молодих вчених і студентів «Фундаментальная и прикладная геологическая наука: достижения, перспективы, проблемы и пути их решения», (Баку, 2013); II міжнародна наукова конференція молодих вчених «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства», (Єреван-Гюмрі-Цахкадзор, 2015); Десята ювілейна Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво у сейсмічних районах України», (Одеса, 2015).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 12 статтях та 10 тезах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури, який включає 207 публікацій. Робота викладена на 147 сторінках і містить 51 рисунок

Автор висловлює вдячність науковому керівнику, члену-кореспонденту НАН України Кендзері Олександрові Володимировичу за постановку задач, об'єктивну критику та цінні наукові поради.

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 наведено огляд розвитку та сучасного стану методики проведення робіт з сейсмічного мікрорайонування (СМР) будівельних майданчиків для прогнозування поведінки ґрунтів під час землетрусів. Приведено результати аналізу існуючих концепцій, методів і підходів.

Суттєвий вплив на спектральний склад і величину коливань на вільній поверхні майданчиків мають фільтруючі властивості осадових порід ґрунтової товщі. Ґрунтова товща вибірково підсилює (або послаблює) коливання в певних частотних діапазонах. Такий фільтр характеризується своєю частотною характеристикою, яка протягом багатьох років практично не міняється. Причиною потенційно небезпечного вибіркового підсилення сейсмічних коливань є інтерференція сейсмічних хвиль, багаторазово відбитих в шарах, і резонансні ефекти при збігу періодів коливань в падаючих сейсмічних хвилях з періодами, які відповідають максимумам частотних характеристик ґрунтової товщі.

Резонансні явища є одною з найпоширеніших причин пошкоджень і руйнувань будівель і споруд. Особливо небезпечним є резонансне підсилення коливань будівель і споруд, в яких центр тяжіння значно віддалений від точки опори, що характерно для висотних будівель, мостових опор, труб та ін. Як правило, об'єкти такого типу характеризуються низькими значеннями власних загасань.

Питанням підсилення сейсмічних впливів ґрунтовими умовами присвячено багато публікацій [Мушкетов, 1903; Сюехиро, 1935; Медведєв, 1962; Кригер и др., 1980; Dravinski, 1983; Rogers et al., 1984; Hauksson et al., 1987; Singh et al., 1988; Seed et al., 1988; Оценка влияния..., 1988; Aki, 1988; Abbis, 1989; Kudo, 1995; Suetomi, 2004; Заашвили, 2009; Алёшин, 2010; Стародуб, 1986, 1996, 1998; Малицький, 1998, 2003, 2008; Кендзера, 1989, 1996, 2010, 2015] та ін.

Чинними нормативними документами ДБН В.1.1-12:2014, РСН 60-86 та РСН 65-87, які регламентують проектування і будівництво у сейсмічних районах України, не достатньо враховуються резонансні та нелінійні властивості ґрунтів, хоча відомо, що при інтенсивних сейсмічних впливах нелінійні явища відіграють важливу роль. Особливо сильно вони проявляються в рихлих осадових ґрунтах, на яких, останнім часом все частіше зводять нові будинки і промислові споруди. З огляду на це, існує нагальна потреба в детальних дослідженнях та розробці відповідних методів прогнозування поведінки ґрунтів з погіршеними сейсмічними властивостями при інтенсивних сейсмічних впливах.

Вказано, що для врахування нелінійних властивостей ґрунтів при розрахунку їх частотних характеристик доцільно використовувати емпіричні залежності коефіцієнта поглинання і модуля зсуву від величини зсувної деформації. Використання точніших, науково обґрунтованих даних дозволить забезпечити необхідну сейсмостійкість будинків і споруд та, одночасно, суттєво знизити собівартість сейсмостійкого будівництва шляхом запобігання виникненню в них резонансних ефектів.

У другому розділі розглянуто теоретичні та методологічні основи розрахункових методів математичного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи. Методи дозволяють розраховувати спектральні характеристики і акселерограми на вільній поверхні або у внутрішніх точках шаруватої ґрунтової товщі при падінні сейсмічних коливань з нижнього півпростору на її подошву.

При розрахунку реакції ґрунту на сейсмічні впливи різної інтенсивності відповідальним кроком є вибір ідеалізованої моделі його лінійної або нелінійної поведінки. В даний час у світовій практиці інженерної сейсмології використовуються три моделі поведінки ґрунтів: лінійна, еквівалентна лінійна і нелінійна. Всі ці моделі спираються на залежності «напруження-деформація», які описують як загальні закономірності поведінки ґрунтів так і їх нелінійні властивості.

Якщо припустити, що деформації ґрунту будуть невеликими (нижчі 10^{-6}), то виправданим буде застосування лінійної (пружної) моделі, і ключовим параметром для адекватного моделювання буде модуль зсуву G [Ишихара, 2006].

Якщо передбачаються деформації середньої величини ($10^{-5} - 10^{-3}$), реакція ґрунту стає в'язко-пластичною, при цьому G зменшується при збільшенні деформації зсуву γ . В процесі навантаження виникає дисипація енергії, яка в ґрунтах має гістерезисний характер. Крива $G/G_{max}(\gamma)$, яка показує зменшення модуля зсуву із зростанням деформації, передає ту ж інформацію, що і скелетна (характеристична) крива. Для оцінки енергопоглинаючих властивостей ґрунту використовується безрозмірний коефіцієнт відносного поглинання D .

Деформації середньої величини не викликають прогресуючої зміни властивостей ґрунту, тому G і D , в цьому випадку, не залежать від кількості циклів. Такий різновид реакції ґрунту характеризується наявністю гістерезису «стабільного» типу (non-degraded hysteresis type) [Ишихара К., 2006]. В якості аналітичного інструменту в такому випадку використовується еквівалентна лінійна модель, яка заснована на концепції в'язкої пружності. Припускається, що максимальні зміщення викликаються поперечними коливаннями, які поширюються вертикально вгору з півпростору. У цьому випадку, всі зміщення на поверхні будуть горизонтальними і всередині кожного шару ґрунтової товщі будуть задовольняти хвильове рівняння:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}, \text{ де } u = u(t, z) - \text{горизонтальне зміщення, } t - \text{час, } \eta -$$

в'язкість, ρ - густина. Амплітуда гармонічних коливань з частотою ω задається у формі: $u(z, t) = U(z)e^{i\omega t}$. Тоді загальний розв'язок хвильового рівняння буде:

$U(z) = Ae^{ikz} + Be^{-ikz}$, де A і B - амплітуди коливань, що поширюються вгору і вниз

по осі Z ; k - комплексне хвильове число: $k^2 = \frac{\rho\omega^2}{G + i\omega\eta} = \frac{\rho\omega^2}{G^*}$, де η - в'язкість, G^* -

комплексний модуль зсуву, який може бути розрахований за однією з формул:

$G^* = G(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2})$ [Udaka, 1975], $G^* = G(1 - D^2 + i2D)$ [Kramer, 1996],

$G^* = G(1 - i2D)$ [Kramer, 1996].

Амплітуди A і B змінюються від шару до шару і описуються рівняннями, що витікають з умов неперервності напружень і зміщень на границях шарів:

$$A_{j+1} + B_{j+1} = A_j e^{ik_j h_j} + B_j e^{-ik_j h_j},$$

$$A_{j+1} - B_{j+1} = \alpha(A_j e^{ik_j h_j} + B_j e^{-ik_j h_j}), \text{ де } \alpha_j = \frac{k_j G_j^*}{k_{j+1} G_{j+1}^*}.$$

Використовуючи ці рівняння можна отримати рекурентні формули для амплітуд зміщень A_{j+1} B_{j+1} в шарі $j+1$ через амплітуди в шарі j :

$$A_{j+1} = \frac{1}{2} A_j (1 + \alpha_j) e^{ik_j h_j} + \frac{1}{2} B_j (1 - \alpha_j) e^{-ik_j h_j}, \quad B_{j+1} = \frac{1}{2} A_j (1 - \alpha_j) e^{ik_j h_j} + \frac{1}{2} B_j (1 + \alpha_j) e^{-ik_j h_j},$$

$$\text{або } \begin{Bmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \alpha_j) e^{ik_j h_j} & (1 - \alpha_j) e^{-ik_j h_j} \\ (1 - \alpha_j) e^{ik_j h_j} & (1 + \alpha_j) e^{-ik_j h_j} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_j \\ B_j \end{Bmatrix}.$$

Враховуючи, що на вільній поверхні напруження дорівнюють нулю, отримаємо $A_1 = B_1$, тобто амплітуди падаючої і відбитої хвилі на вільній поверхні ґрунту є рівними за величиною.

Амплітуди хвиль (A і B) в межах моделі ґрунтової товщі розраховуються на кожній частоті (в припущенні, відомої жорсткості і поглинання в межах кожного шару) і використовуються для розрахунку реакції на поверхні.

Застосовуючи рекурентні формули послідовно до всіх шарів від 1 до j , можна виразити амплітуди хвиль у всіх шарах через A_1 і B_1 . Частотна характеристика, яка пов'язує амплітуди зміщення в i -му і j -му шарах, має вигляд:

$$H_{ij}(\omega) = \frac{|u_i(\omega)|}{|u_j(\omega)|} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)}.$$

Частотна характеристика багатошарової ґрунтової товщі є складнішою, але вона так само розраховується як і у випадку одного шару на півпросторі. Для її розрахунку на практиці використовуються такі комп'ютерні програми як: SHAKE, PROSHAKE [Schnabel et al., 1972; EduPro Civil System, 1998]; EERA [Bardet, Tobita, 2001]; DEEPSOIL [Hashash and Park, 2001] та інші.

Швидкість $\dot{u}(z, t)$ і прискорення $\ddot{u}(z, t)$ пов'язанні із зміщенням наступними

$$\text{співвідношеннями: } \dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \text{і} \quad \ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t).$$

З цих рівнянь видно, що при переході від шару i до j частотна характеристика однаково описує підсилення сейсмічних коливань як для зміщень, так і для прискорень та швидкостей.

Реакція ґрунтової товщі на поверхні розраховується шляхом перемноження амплітудного спектру Фур'є вхідного сигналу на півпросторі на амплітудну частотну характеристику (АЧХ) ґрунтової товщі і відповідного сумування їх фазових характеристик $Y_i(\omega) = H_{ij}(\omega) Y_j(\omega)$, де $Y_i(\omega)$ - амплітудний спектр Фур'є на поверхні, $Y_j(\omega)$ - амплітудний спектр Фур'є вхідного сигналу на півпросторі, $H_{ij}(\omega)$ - амплітудна частотна характеристика шаруватої ґрунтової товщі.

Зсувна деформація на глибині z в час t може бути отримана з хвильового

$$\text{рівняння як: } \gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik(Ae^{ikz} - Be^{-ikz})e^{i\omega t}. \text{ Відповідне зсувне напруження на}$$

глибині z і в час t буде: $\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t)$.

Нелінійна поведінка ґрунту і відповідно зміна параметрів G і D , в залежності від зсувної деформації γ , при еквівалентному лінійному моделюванні враховуються шляхом проведення ітерацій до отримання задовільного розв'язку [Kramer, 1996].

Ітерації проводяться наступним чином:

1. Для кожного шару ініціалізуються початкові значення G_i і D_i при малих значеннях деформації зсуву.

2. Розраховуються зміщення ґрунту i , відповідно, максимальні амплітуди γ в кожному шарі.

3. Використовуючи максимальне значення γ розраховується ефективна деформація зсуву γ_{eff} в кожному шарі: $\gamma_{eff}^i = R_\gamma \gamma_{max}^i$, де верхній індекс означає номер ітерації, R_γ - залежить від магнітуди M землетрусу і приймається однаковим для всіх шарів моделі ґрунтової товщі та розраховується за формулою: $R_\gamma = (M - 1)/10$.

4. За розрахованими γ_{eff} вибираються нові параметри $G^{(i+1)}$ і $D^{(i+1)}$ для наступної ітерації.

5. Кроки 2 - 4 повторюються до тих пір, поки різниця між розрахованими значеннями модуля зсуву і коефіцієнта поглинання в двох послідовних ітераціях не стане менше деякого заздалегідь заданого значення для всіх шарів. Зазвичай 3 - 5 ітерацій є достатньо для досягнення різниці меншої (5 - 10)% [Kramer, 1996].

Ітеративні обчислення забезпечують відповідність параметрів G і D рівням деформацій γ у всіх шарах ґрунтової товщі.

Для зсувної деформації, що перевищує 10^{-2} , суттєва зміна характеристик ґрунту може бути пов'язана не тільки із збільшенням γ , а також із наявністю ряду повторювань (циклів) навантаження. Така різновидність реакції ґрунту характеризується гістерезисом «прогресуючого» типу (degraded hysteresis type) [Ишихара К., 2006]. Вважається, що величина зміни G і D при циклічному навантаженні залежить від величини зміни ефективного напруження усестороннього стиску при нерегулярному прикладенні дотичних напружень в часі. Після встановлення закономірності зміни ефективних напружень, необхідно визначити закономірність для встановлення напружено-деформованого стану на кожному етапі процесу навантаження, розвантаження і повторного навантаження. Одним з найбільш розповсюджених підходів, які для цього використовуються, є закон Мезінга (Masing law). Для аналізу реакції ґрунту, напружено-деформований стан якого характеризується великими деформаціями, близькими до границі руйнування, необхідно використовувати чисельний метод з покроковим інтегруванням. В якості аналітичного інструменту в цьому випадку застосовується нелінійне моделювання. При інтегруванні рівнянь руху з малим кроком по часу можна використовувати одну з нелінійних залежностей (моделей) «напруження-деформація». На кожному кроці обчислень, для визначення властивостей ґрунту в задані моменти часу звертаються до обраної моделі. Таким чином, нелінійна залежність «напруження-деформація» буде представлена серією лінійних наближень з малим кроком в часовій області. При розрахунках з використанням нелінійних моделей різні дослідники використовували різні нелінійні залежності «напруження-деформація». У

програмних продуктах для одновимірного нелінійного моделювання реакції ґрунту залежність «напруження - деформація» описується наступними циклічними нелінійними моделями: Ромберга - Осгуда в CHARSOIL [Streeter et al, 1974]; Айвена - в NONLIZ [Joyner, Chen, 1975]; Мартіна - Давиденкова в MASH [Martin, Seed, 1978]; гіперболічною моделлю в DESRA [Lee, Finn, 1978], TARA [Finn et al., 1986; Finn et al., 1989]; Хардина - Дрневіча - Кундалла - Пайка (HDCP) в TESS1 [Pyke, 1985]; Айвена - Мроза (IM - моделлю) в NERA [Bardet, Tobita, 2001]; модифікованою гіперболічною моделлю в DEEPSOIL [Hashash, Park, 2001].

Рівняння руху в часовій області має вигляд:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t), \text{ де } [M] - \text{ матриця мас, } [C] -$$

матриця поглинання, $[K]$ - матриця жорсткості, $\{\ddot{u}\}$ - вектор прискорення, $\{\dot{u}\}$ - вектор швидкості, $\{u\}$ - вектор зміщення, $\{I\}$ - одиничний вектор, $\ddot{u}_g(t)$ - вхідна акселерограма.

В програмному комплексі DEEPSOIL рівняння руху розв'язується з малим кроком по часу з використанням методу інтегрування Ньюмарка β [Newmark, 1959]. Матриці $[M]$, $[C]$ і $[K]$ на кожному кроці обновлюються для врахування зміни властивостей ґрунту в часі. Для цього на кожному кроці звертаємося до циклічної модифікованої гіперболічної моделі, напружено-деформований стан якої описується рівнянням:

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{G_{mo}}{\tau_{mo}} \gamma \right)^S} = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^S}, \text{ де } G_{mo} - \text{ початковий модуль зсуву; } \tau_{mo} -$$

напруження, при деформації 1%; γ_r - зсувна деформація, що відповідає границі міцності; β і S - параметри, що регулюють форму кривої.

З розглянутих в розділі методів розрахунку реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи нелінійну поведінку ґрунтів враховує еквівалентне лінійне (зміна властивостей не залежить від кількості циклів) і нелінійне (наявність циклів навантаження викликає зміну властивостей) моделювання.

Діючими нормативними документами [ДБН В.1.1-12:2014; РСН 60-86; РСН 65-87] для всього діапазону зсувних деформацій ґрунту передбачається використання лише лінійної моделі та її модифікацій.

Використання програмних продуктів для еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання потребує додаткових параметрів розрахункових моделей ґрунту у вигляді залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, які отримуються в результаті динамічних випробувань ґрунтів при проведенні польових або лабораторних досліджень. В Україні такі випробування не проводилися. Дослідження зміни G і D при деформаціях різної величини вимагають складного спеціального обладнання. В основному, такі дослідження проводилися в Японії та США.

Різноманіття ґрунтів та велика кількість результатів закордонних досліджень потребує аналізу і систематизації досвіду лабораторних і польових досліджень зміни G і D при деформаціях різної величини. З огляду на це, стала актуальною задача розробки методики задання нелінійних властивостей ґрунтових шарів

розрахункових моделей відповідними залежностями $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, які повинні максимально точно відображати деформаційні властивості реальних типів ґрунту. Вирішення цієї задачі є необхідним для ефективного практичного застосування методів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи в умовах реальних будівельних та експлуатаційних майданчиків на території країни.

В третьому розділі розглянуто задачу розробки методики задання деформаційних характеристик шарів розрахункових моделей ґрунтової товщі для еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання її реакції на сейсмічні впливи.. Властивість нелінійності деформаційних характеристик ґрунту виражається через модуль зсуву і коефіцієнт поглинання, величини яких залежать від величини зсувних деформацій.

У розділі представлено результати збору, аналізу і систематизації результатів лабораторних та польових досліджень деформаційних характеристик ґрунтів, одержаних в Японії та США, і викладених в численних роботах [Seed, Idriss, 1970; Ishibashi, Zhang, 1993; Roblee, Chiou, 2004; Lanzo et al., 2009] та ін. На цій основі створено базу залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, для різних типів ґрунтів, характерних для будівельних майданчиків на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів. База даних створена в xls-форматі в числовому та графічному вигляді. Використаний формат дозволяє зручно та оперативно підбирати дані розрахункових моделей при використанні таких програмних продуктів як: EERA, NERA, PROSHAKE, DEEPSOIL та інших.

В розділі проаналізовано результати дослідження факторів, які впливають на форму залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$. За результатами аналізу виділено основні параметри, за якими швидко і максимально точно можна підібрати для кожного шару моделі ґрунтової товщі відповідні залежності з сформованої бази даних. Для глинистих порід: це індекс пластичності PL та глибина залягання; для піщаних порід: розмір частинок, їх процентний вміст та глибина залягання. Ці параметри контролюють форму графіка вказаних залежностей.

В розділі представлено також результати досліджень впливу епістемічних помилок (виникаючих при виборі залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для ґрунтових шарів розрахункової сейсмогеологічної моделі) на параметри амплітудно-частотної характеристики ґрунту, розрахованої з використанням математичного еквівалентного лінійного моделювання його реакції на сейсмічні впливи. Для розрахунків використовувався програмний продукт PROSHAKE. Встановлено, що помилки при врахуванні літологічного складу шарів ґрунту в розрахунковій моделі приводять до зміщення частот максимумів АЧХ, значної зміни коефіцієнтів підсилення коливань, а також до появи «хибних» максимумів на високих частотах.

При використанні залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, отриманих в результаті досліджень деформаційних характеристик ґрунтів в 2000-х роках, порівняно із залежностями, отриманими в 70-х роках минулого століття, спостерігається незначне збільшення ширини частотної області, в якій спостерігаються підсилення сейсмічних коливань, і чіткіше проявляються максимуми АЧХ (див. рис.1). Зміщення частот максимумів при цьому не спостерігається.



Рис. 1. АЧХ ґрунтової товщі під будівельним майданчиком по вул. Березняківська, 30 в Києві з врахуванням нелінійних властивостей для пісків з робіт: а) [Roblee and Chiou, 2004]; б) [Seed, Idriss, 1970]

Створена автором база даних $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$ для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків на території України, відкриває можливість застосування методів моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи з врахуванням нелінійної поведінки ґрунтів. Розроблена методика формування розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі, шляхом введення залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, які відображають нелінійні властивості ґрунту, дозволяє (на рівні сучасних знань) максимально наблизити обчислювані частотні характеристики ґрунтової товщі до реальних. Це підвищить обґрунтованість і точність визначення кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на досліджуваних будівельних і експлуатаційних майданчиках. Параметри сейсмічної небезпеки необхідні для розробки ефективних заходів із забезпечення сейсмостійкості проєктованих і наявних об'єктів.

У **четвертому розділі** представлено результати виконаного автором математичного лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного розрахунку реакції на сейсмічні впливи ряду моделей ґрунтових товщ, які відрізняються за потужністю осадових відкладів (H) і категорією ґрунтів за сейсмічними властивостями (від I-ї до IV-ї) згідно [ДБН В.1.1-12:2014, 2014].

Математичне моделювання здійснено з використанням програмних продуктів PROSHAKE, EERA, NERA, DEEPSOIL. При обчисленні змінювався вхідний сейсмічний сигнал (зондуюча акселерограма) з різною величиною максимальних пікових прискорень: $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$ і $\ddot{u}_{\max} = 0,43g$, що, приблизно, відповідає інтенсивності сейсмічних струшувань 6 - 7 і 8 - 9 балів, відповідно. Результати розрахунків представлено у вигляді АЧХ ґрунтових моделей, розрахункових акселерограм та спектрів реакції на них одиничних осциляторів.

Дослідження впливу потужності осадових відкладів та сейсмічних властивостей ґрунтів на частотні характеристики дозволило встановити, що погіршення сейсмічних властивостей ґрунтів і збільшення потужності осадових відкладів зміщують максимуми частотної характеристики в бік низьких частот, незалежно від

інтенсивності сейсмічного впливу. Врахування підсилення сейсмічних впливів в діапазоні низьких частот є важливим для сейсмостійкого проектування висотних і протяжних споруд, оскільки такі споруди характеризуються низькими власними частотами коливань. Оскільки коливання від сильних підкорових землетрусів зони Вранча є низькочастотними, довготривалими і можуть поширюватися на великі відстані без значного загасання, для об'єктів, розташованих на території України, необхідно враховувати можливість виникнення резонансних явищ на низьких частотах.

В розділі приведено також результати порівняльного аналізу амплітудно-частотних характеристик моделей ґрунтових товщ побудованих з використанням лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання. Моделі ґрунтової товщі відповідали реальним будівельним майданчикам. Порівнювалися також, побудовані з допомогою одержаних АЧХ, розрахункові акселерограми та спектри реакції на них одиничних осциляторів.

Для прикладу, на рис. 2 представлено спектри реакції одиничних осциляторів із 5%-ним власним загасанням (від критичного), розраховані для ґрунтової товщі під будівельним майданчиком багатопверхового житлового будинку по вул. Глибочицька в Києві.

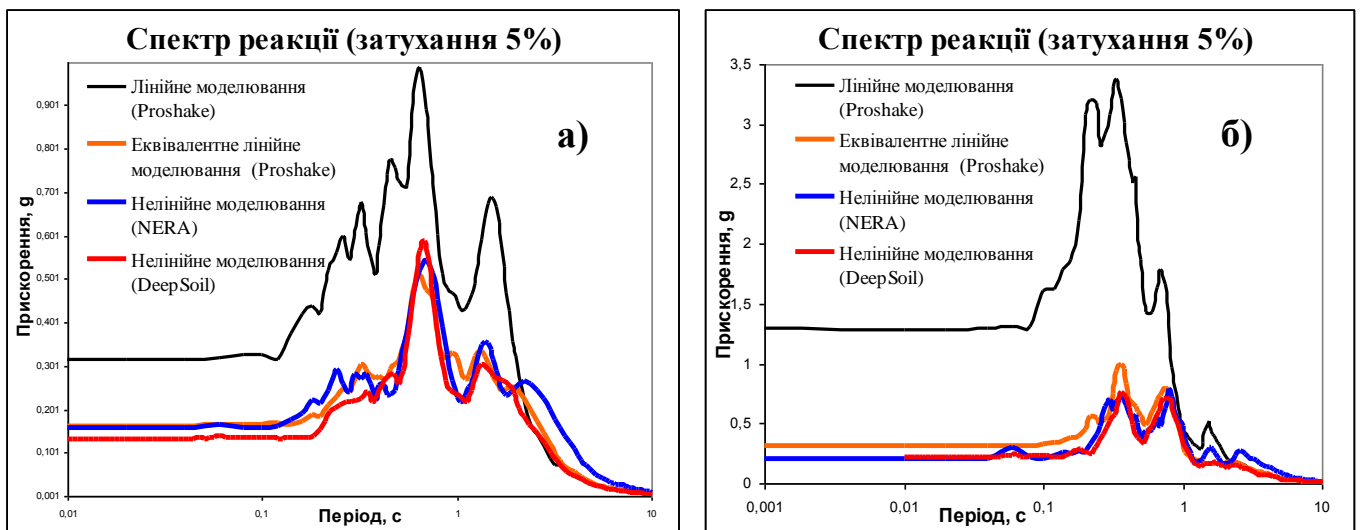


Рис.2. Спектри реакції одиничних осциляторів на акселерограми землетрусу з максимальними піковими прискореннями: а) $\ddot{u}_{\max} = 0,07g$, б) з $\ddot{u}_{\max} = 0,43g$.

З рис. 2 видно, що із збільшенням амплітуди сигналу, падаючого на нижній півпростір, зростає розбіжність в результатах лінійного, нелінійного і еквівалентного лінійного моделювання, що є наслідком прояву нелінійної поведінки ґрунтів.

Порівняльний аналіз отриманих результатів дозволив зробити наступні висновки:

- лінійне моделювання призводить до одержання завищених коефіцієнтів підсилення та до появи хибних резонансних піків на високих частотах. Слід відзначити, що настільки значні теоретичні коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань, в реальних ґрунтових умовах не спостерігаються;

- лінійне моделювання не передбачає впливу інтенсивності падаючого сигналу на частотні характеристики ґрунтової товщі. В такому випадку, підсилення в АЧХ спостерігаються на однакових частотах, незалежно від величини амплітуди падаючої хвилі.

- врахування нелінійних властивостей ґрунтів, як при еквівалентному лінійному, так і при нелінійному моделюванні їх реакції на сейсмічні впливи, призводить до зменшення коефіцієнта підсилення сейсмічних коливань та зміщення піків резонансних частот в низькочастотну область.

За результатами власних досліджень і досвіду використання різних методів моделювання, представленого в роботах [Midorikawa, 1993; Ishihara et al, 1992; Iai et al., 1995; Kramer, 1996; Arulanandan, Scott, 1994.; Yoshida, Iai, 1998; Stewart et. al., 2008; Алешин, 2010], сформульовано рекомендації щодо доцільності використання лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного методів для моделювання реакції ґрунтової товщі під будівельними майданчиками України на сейсмічні впливи:

1. При моделюванні реакції ґрунтової товщі, складеної ґрунтами I категорії за сейсмічними властивостями, допускається використання лінійної залежності «напруження-деформація» в діапазоні очікуваної максимальної сейсмічної інтенсивності до 9 балів включно.

2. Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами II категорії, лінійне моделювання може використовуватися при очікуваній максимальній інтенсивності до 8 балів.

3. Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами III і IV категорії, необхідно враховувати їх нелінійні властивості при очікуваній інтенсивності, починаючи з 6 балів. Для будівельних майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 6-7 балів необхідно застосовувати еквівалентне лінійне моделювання, а для майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 8 - 9 балів - нелінійне моделювання.

Оскільки для переважної частини України, згідно карт ЗСР-2004 [ДБН В.1.1-12:2014], фонові сейсмічність становить 6 - 7 балів, то, в більшості випадків, доцільним є застосування еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

В розділі представлено також результати перевірки стійкості розв'язку задачі побудови АЧХ моделей реальних ґрунтових товщ під будівельними майданчиками, при використанні еквівалентного лінійного моделювання та наявності випадкових похибок в параметрах моделі. Для розрахунків застосовувався програмний комплекс PROSHAKE. Встановлено, що при наявності випадкових похибок до 20% забезпечується стійкість розв'язку при розрахунку частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.

На рис. 3а приведено графіки максимальних середніх квадратичних відхилень (від точних значень) АЧХ отриманої з випадковими похибками у вхідних параметрах розрахункової моделі ґрунтової товщі в діапазоні відносних значень від 1 до 30 %.

За результатами розрахунків, приведених на рис. 3б, виділено найбільш стійкі до похибок параметри частотних характеристик моделей ґрунтових товщ. Ними виявилися: відносна ширина частотної області (розрахована за формулою з роботи [Берзон и др., 1962]) та частоти резонансного підсилення сейсмічних коливань. Для

вказаних параметрів зміщення резонансних частот при відносних похибках у вхідних даних до 15% не перевищило 5%.

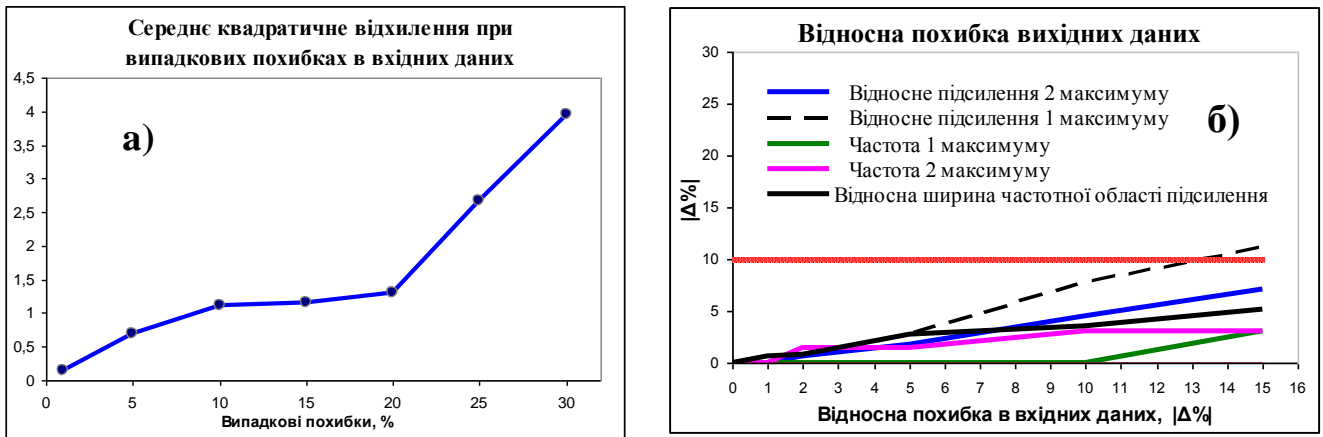


Рис.3. Вплив випадкових похибок у параметрах розрахункових моделей на АЧХ: а) максимальне середнє квадратичне відхилення значень АЧХ, б) відносні похибки параметрів АЧХ

В п'ятому розділі представлено результати розрахунків амплітудно-частотних характеристик ґрунтових товщ для майданчиків ряду існуючих і проєктованих об'єктів в Києві, Одеській області та на інших територіях. Розрахунок проведено із застосуванням технології математичного еквівалентного лінійного моделювання та програмного продукту PROSHAKE. Вхідні дані для моделювання були задані у вигляді розрахункових горизонтально-шаруватих моделей ґрунтового середовища, які формувалися за розробленою автором методикою із застосуванням фондових матеріалів інженерно-геологічних вишукувань під будівництво та сформованої бази залежностей $G(\gamma)$ і $D(\gamma)$, які характеризують нелінійні властивості ґрунтів. Кожна АЧХ є обвідною сімейства графіків АЧХ, розрахованих для 8 реалізацій зондуючих сигналів, заданих у вигляді акселерограм з різними максимальними піковими прискореннями і різним частотним складом.

На рис. 4 представлено розраховані обвідні АЧХ моделей ґрунтових товщ для трьох таксонометричних одиниць (ТО) майданчика НСК «Олімпійський» в Києві.

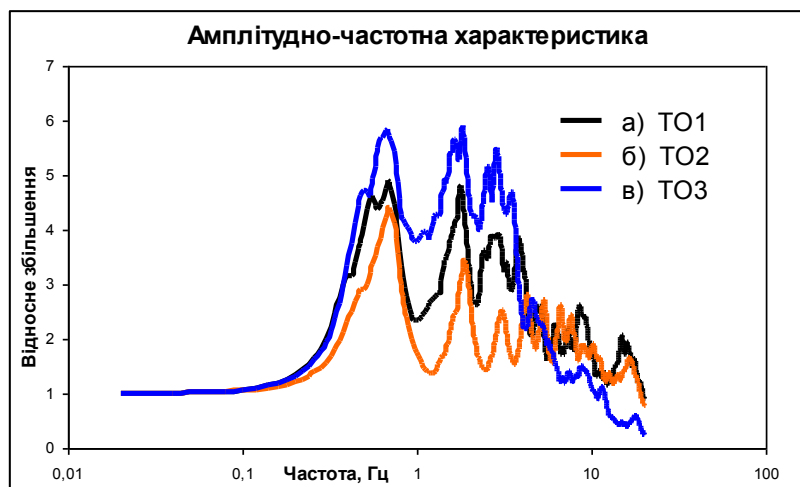


Рис. 4. Обвідні АЧХ ґрунтової товщі під НСК «Олімпійський» для: а) ТО1 (20 свердловин); б) ТО2 (20 свердловин); в) ТО3 (8 свердловин).

На рис. 5 і 6 представлено амплітудно-частотні характеристики ґрунтових товщ для ряду майданчиків проєктованих висотних житлових будинків в Одеській області та Києві.

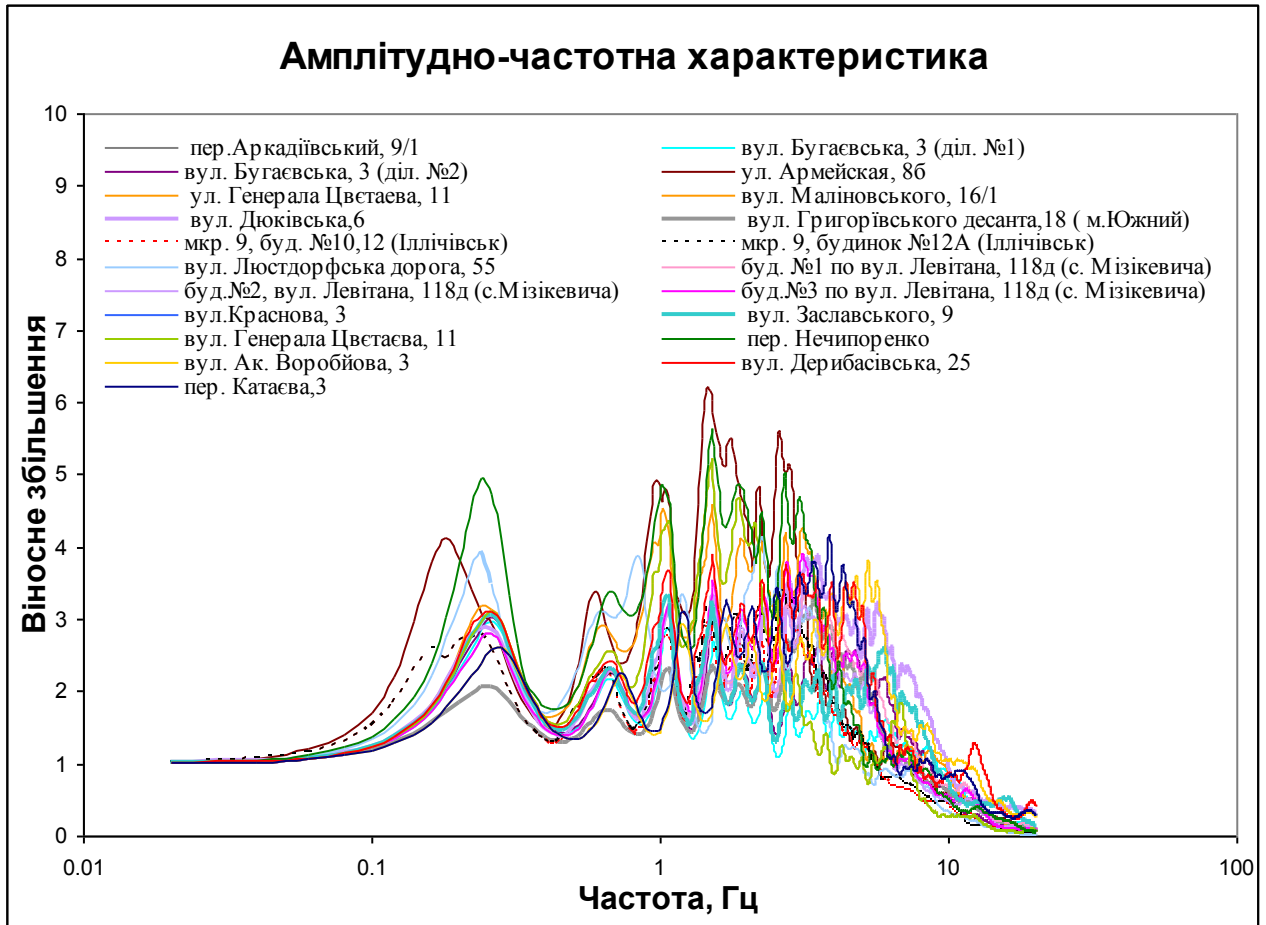


Рис. 5. АЧХ ґрунтових товщ під будівельними майданчиками Одеси та Одеської області

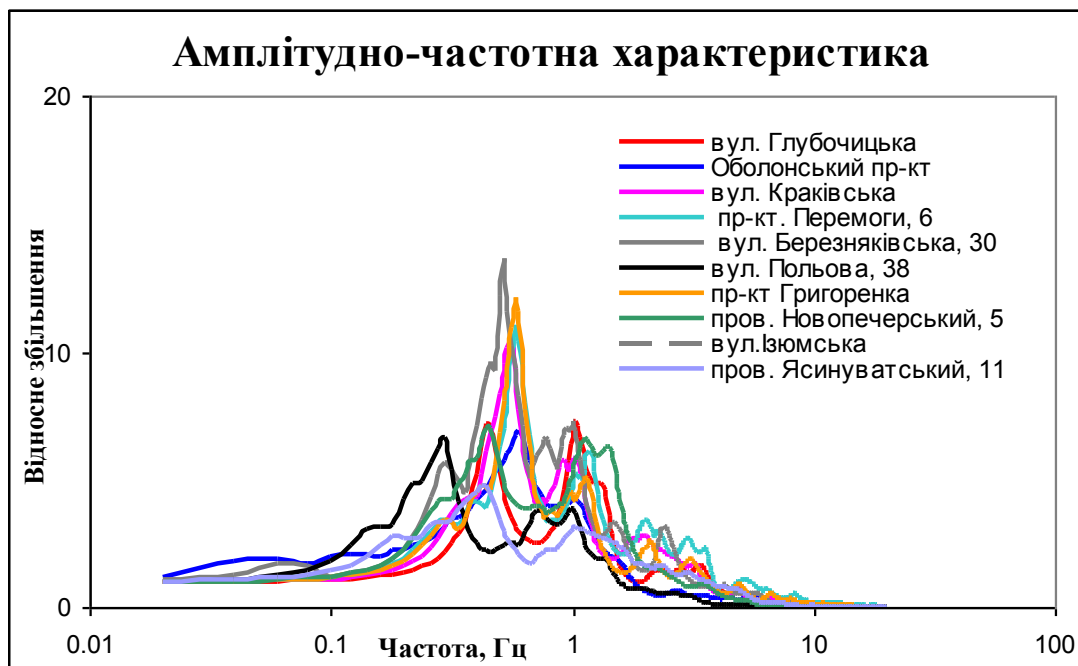


Рис. 6. АЧХ ґрунтових товщ під будівельними майданчиками Києва

На рис. 7 представлено розраховані амплітудно-частотні характеристики ґрунтової товщі під майданчиком: а) основних споруд Кременчуцької ГЕС (на лівому і правому березі); б) реконструкції компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани».

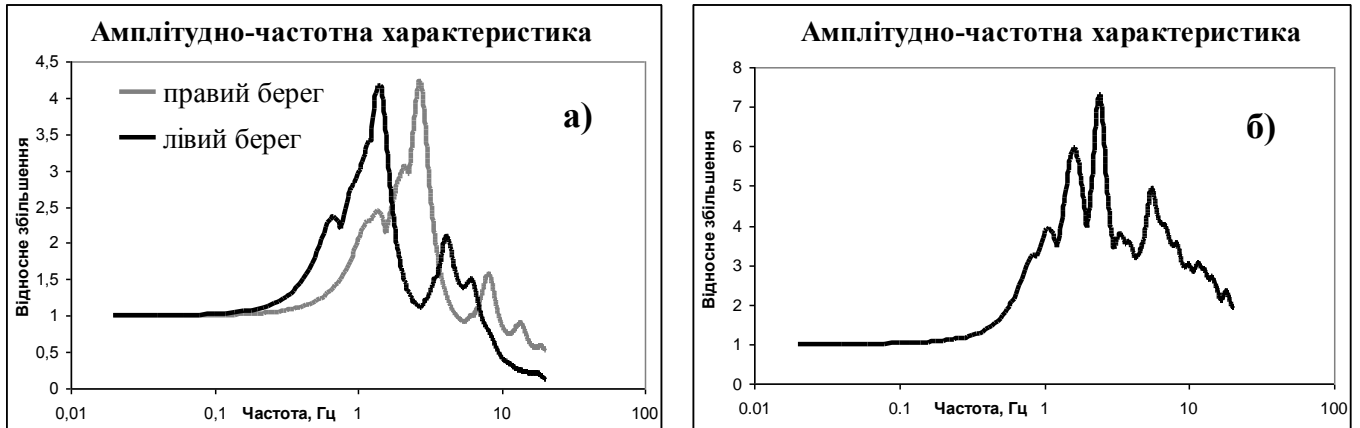


Рис.7. АЧХ ґрунтової товщі під майданчиком: а) основних споруд Кременчуцької ГЕС; б) реконструкції компресорної станції «Південнобузька» газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани»

Всі представлені в розділі частотні характеристики ґрунтових товщ під будівельними та експлуатаційними майданчиками були використані для побудови розрахункових акселерограм, які, в свою чергу, були застосовані при проектуванні нових і визначенні сейсмостійкості існуючих будинків і споруд.

За результатами аналізу розрахованих амплітудно-частотних характеристик моделей ґрунтових середовищ під будівельними майданчиками слід відзначити, що підсилення коливань ґрунтами має складний вигляд, залежить від багатьох факторів і може суттєво відрізнятись для різних будівельних майданчиків. Звідки випливає важливий висновок, що при сейсмостійкому проектуванні будинків і споруд необхідно правильно враховувати фільтруючі властивості ґрунтових комплексів з урахуванням можливого суттєвого збільшення коливань на «резонансних» частотах. Частотні характеристики слід розраховувати з урахуванням впливу реологічних властивостей ґрунтових товщ і застосуванням нелінійних методів розрахунку їх частотних характеристик. Розрахункові акселерограми повинні враховувати особливості коливань, які приходять з вогнищ землетрусів, і фільтруючі властивості ґрунтових комплексів майданчика.

Наявність частотних характеристик, які максимально повно відображають вплив ґрунтової товщі під майбутньою забудовою, дозволяє зменшити вартість будівництва і одночасно підвищити сейсмостійкість споруд шляхом розробки проектних рішень, які перешкоджають збігу власних частот проектованої будівлі з максимумами частотної характеристики ґрунтової товщі.

ВИСНОВКИ

Дисертація містить раніше не захищені наукові положення, які в сукупності розв'язують важливу наукову і практичну задачу визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів з врахуванням їх нелінійних властивостей для цілей сейсмостійкого проектування будівель та споруд. Основні результати дисертаційної роботи є наступними:

1. Розвинуто методику визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів під будівельними майданчиками, яка враховує нелінійну поведінку ґрунтів при сейсмічних впливах. В основі методики лежить аналітично-емпіричний підхід до розрахунку частотних характеристик ґрунтів.
2. Сформовано базу даних, яка в графічному і цифровому вигляді містить інформацію про залежність модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків на території України, зокрема в Києві, Одесі та в місцях розташування ряду важливих об'єктів. Запропоновано в якості індикаторних параметрів в алгоритмі підбору деформаційних характеристик для шарів ґрунту в розрахункових моделях використовувати: для глинистих порід - індекс пластичності та глибину залягання; для піщаних - розмір частинок, їх процентний вміст і глибину залягання.
3. Розроблено та впроваджено при сейсмічному мікрорайонуванні майданчиків будинків і відповідальних споруд розташованих на території України алгоритм побудови розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі з врахуванням її нелінійних деформаційних характеристик.
4. Для умов України встановлено межі використання методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного математичного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи для будівельних майданчиків з різними категоріями ґрунтів за сейсмічними властивостями та різною величиною прогнозованої сейсмічної інтенсивності (бальності).
5. Встановлено граничні значення епістемічних і випадкових похибок у параметрах розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів, при яких забезпечуються одержання стійких розв'язків задачі побудови амплітудно-частотних характеристик методом еквівалентного лінійного моделювання.
6. Розвинуто методику визначення резонансних властивостей ґрунтових комплексів впроваджено при визначенні сейсмічної небезпеки майданчиків: НСК «Олімпійського», газоперекачувальних станцій газопроводу «Кременчук - Ананів - Богородчани», гідротехнічних споруд Кременчуцької ГЕС, ряду висотних будинків в Києві та в Одеській області. Розраховано частотні характеристики ґрунтів з врахуванням їх нелінійних властивостей та визначено резонансні частоти, на яких спостерігається значне підсилення сейсмічних коливань локальними ґрунтовими умовами кожного із майданчиків. Сформульовано рекомендації щодо запобігання виникненню резонансних ефектів у проєктованих об'єктах за рахунок збігу максимальних частот сейсмічних коливань, падаючих на підоснову ґрунтової товщі, з максимумами її частотних характеристик і частотами власних коливань будинків та споруд.

СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ, ОПУБЛІКОВАНИХ В ФАХОВИХ НАУКОВИХ ВИДАННЯХ

1. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Врахування амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі при сейсмічному мікрорайонуванні будівельного майданчика в м. Одесі // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка, Геологія. - 2010. - Вип.49. - С.10-13.
2. Кендзера О.В., Скляр О., Лісовий Ю.В., Семенова Ю.В., Корнієнко Є.Є. Визначення рівня сейсмічної небезпеки будівельного майданчика НСК «Олімпійський» в м. Києві // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка, Геологія. - 2010. - Вип.50 - С.16-22
3. Кендзера О.В., Лісовий Ю.В., Амашукелі Т.А., Фарфуляк Л.В., Семенова Ю.В. Lessons for Ukraine about recent strong earthquakes in the world // Геофизический журнал. - 2010. - №4. - Т. 32. - С.60-62
4. Старостенко В.І., Кендзера О.В., Лісовий Ю.В., Семенова Ю.В. Розвиток сейсмологічної мережі на території України для цілей сейсмічного захисту // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. - 2011. - Вип. 19. - С. 144-150
5. Гурова І.Ю., Семенова Ю. В. Землетрус 07.05.2008 року в північно-західній частині Чорного моря // Вісник КНУ ім. Т. Шевченка, Геологія. - 2012. - Вип.58 - С.20-22
6. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Методи визначення резонансних властивостей ґрунтової товщі при проектуванні сейсмостійких будівель і споруд // Будівельні конструкції. Будівництво в сейсмічних районах України. - 2015. - № 82. - С. 318–328
7. Кендзера А.В., Егупов В.К., Вербицкая О.С., Семенова Ю.В., Лесовой Ю.В., Егупов К.В., Марьенков Н.Г., Бабик К.Н. О необходимости сейсмического микрорайонирования строительных площадок высотных зданий и ответственных сооружений в слабосейсмических районах Украины // Будівельні конструкції. Будівництво в сейсмічних районах України. - 2015. - № 82. - С. 44–66
8. Семенова Ю.В. Расчетные методы определения резонансных свойств грунтов при сейсмическом микрорайонировании // Международный научно-исследовательский журнал. -2015. - № 10 (41) - Часть 4. - С.100-103. DOI 10.18454/IRJ.2015.41.202
9. Семенова Ю.В. Моделирование реакции грунта при сейсмическом микрорайонировании строительных участков // Геофизический журнал - 2015 - №6 - Т.37 - С.137-153
10. Кендзера А.В., Егупов В.К., Вербицкая О.С., Семенова Ю.В., Лесовой Ю.В., Егупов К.В., Марьенков Н.Г., Бабик К.Н. Сейсмическое микрорайонирование строительных площадок для сейсмостойкого проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах Украины // Наука і будівництво - 2015. - № 4. - С.12-18.
11. Кендзера О.В., Семенова Ю.В. Встановлення спектральних характеристик ґрунтової товщі при проектуванні сейсмостійких будівель і споруд // Наука і будівництво - 2015. - № 4. - С.48-50.
12. Кендзера А.В., Семенова Ю.В. Влияние резонансных и нелинейных свойств грунтов на сейсмическую опасность строительных площадок // Геофизический журнал - 2016 - №2. - С.20-22

АНОТАЦІЯ

Семенова Ю.В. Методика встановлення резонансних властивостей ґрунтових комплексів при сейсмічному мікрорайонуванні. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 - геофізика. - Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, 2016.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню методики визначення резонансних властивостей ґрунтів, з врахуванням їх нелінійної поведінки при сейсмічних впливах різної інтенсивності. Удосконалення методики побудови частотних характеристик ґрунтових комплексів є необхідним для узгодження методики сейсмічного мікрорайонування майданчиків в сейсмічних районах України з рекомендаціями «Єврокод-8». В основі удосконаленої методики розрахунку частотних характеристик ґрунтів лежить формування розрахункових моделей ґрунтових товщ із використанням їх емпіричних деформаційних характеристик і застосування математичного еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи. При побудові розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтів використовуються залежності модуля зсуву і коефіцієнта поглинання від величини зсувної деформації із сформованої автором бази даних деформаційних властивостей різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків, розташованих на території України. Удосконалену методику визначення резонансних властивостей ґрунтів впроваджено при визначенні сейсмічної небезпеки майданчиків таких об'єктів як: НСК «Олімпійський», газоперекачувальні станції газопроводу «Кременчук – Ананів - Богородчани», гідротехнічних споруд Кременчуцької ГЕС, ряду висотних будинків в Києві, в Одеській області та інших.

Ключові слова: землетрус, сейсмічна небезпека, сейсмічне мікрорайонування, математичне моделювання, нелінійні властивості ґрунтів, частотна характеристика, резонансні властивості ґрунтів.

АННОТАЦИЯ

Семёнова Ю.В. Методика определения резонансных свойств ґрунтовых комплексов при сейсмическом микрорайонировании. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 04.00.22 - геофизика. - Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена совершенствованию методики определения резонансных свойств ґрунтов, с учетом их нелинейного поведения при сейсмических воздействиях различной интенсивности. Совершенствование методики построения частотных характеристик ґрунтовых комплексов необходимо для согласования методики сейсмического микрорайонирования площадок в сейсмических районах Украины с рекомендациями «Еврокод-8». В основе усовершенствованной методики расчета частотных характеристик ґрунтов лежит формирование расчетных моделей ґрунтовых толщ с использованием их эмпирических деформационных характеристик и применение математического эквивалентного линейного и нелинейного моделирования реакции ґрунтов на

сейсмические воздействия. При построении расчетных сейсмогеологических моделей грунтов используются зависимости модуля сдвига и коэффициента поглощения от величины сдвиговой деформации из сформированной автором базы данных о деформационных свойствах различных типов грунтов, характерных для площадок, расположенных на территории Украины. Для условий страны установлены границы использования методов линейного, эквивалентного линейного и нелинейного математического моделирования реакции грунтов на сейсмические воздействия для строительных площадок с различными категориями грунтов по сейсмическим свойствам и различной величиной прогнозируемой сейсмической интенсивности (балльности). Установлены значения эпистемических и случайных погрешностей в параметрах расчетных сейсмогеологических моделей грунтов, при которых обеспечиваются устойчивые решения задачи построения амплитудно-частотных характеристик методом эквивалентного линейного моделирования. Усовершенствованная методика определения резонансных свойств грунтов внедрена при определении сейсмической опасности площадок таких объектов как НСК «Олимпийский», газоперекачивающие станции газопровода «Кременчуг – Ананьев - Богородчаны», гидротехнические сооружения Кременчугской ГЭС, ряд высотных домов в Киеве, в Одесской области и др.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмическая опасность, сейсмическое микрорайонирование, математическое моделирование, нелинейные свойства грунтов, частотная характеристика, резонансные свойства грунтов.

ABSTRACT

Semenova Yu. The method of resonance properties of soil complex assessment for seismic microzoning. – the Manuscript.

The thesis for a Ph.D. degree in physical and mathematical sciences, specialty 04.00.22 – geophysics – S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to improving the methodology for determining of the resonance properties of soils, taking into account their nonlinear behavior while seismic effects of varying intensity. Improved method of constructing of the frequency characteristics of ground is necessary to bring the methods of seismic microzoning of areas of buildings and industrial structures placement in seismic regions of Ukraine for the regulatory requirements of "Eurocode-8". The improved methodology of calculating the frequency characteristics of the soil is based on forming computational models of soil strata using their empirical deformation characteristics and application of mathematical equivalent linear and nonlinear modeling of soil response to seismic effects. In constructing seismic calculation models used strain-dependent shear modulus and damping ratio from the author's database which comprises the deformation properties of different soil types typical for sites located in the Ukraine. The improved method for determining the resonance properties of soils has been implemented in the determination of seismic hazard of sites of such objects as NSK "Olympic", pipeline pumping station "Kremenchug - Ananiev - Bohorodchany", waterworks of Kremenchug HPP, a number of high-rise buildings in Kiev, Odessa region and others.

Keywords: earthquake, seismic hazard, seismic microzoning, mathematical modelling, nonlinear soil properties, frequency response, resonance properties of soils.