



**СЕМЕНОВА**  
**Юлія Володимирівна** – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник відділу сейсмічної небезпеки Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України  
<https://orcid.org/0000-0003-4628-8663>

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКЦІЇ ГРУНТІВ НА СЕЙСМІЧНІ ВПЛИВИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ СПОРУД ЗА ЄВРОПЕЙСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ

За матеріалами наукового повідомлення  
на засіданні Президії НАН України  
30 травня 2018 року

*Розвинуто методику визначення резонансних властивостей ґрунтів під будівельними майданчиками з урахуванням нелінійних ефектів, в основі якої лежить аналітично-емпіричний підхід до розрахунку частотних характеристик ґрунтів. Удосконалено методику побудови частотних характеристик ґрунтових комплексів для сейсмічного мікрорайонування майданчиків у сейсмічних районах України з метою її узгодження з рекомендаціями європейських будівельних стандартів «Єврокод-8». Удосконалену методику визначення резонансних властивостей ґрунтів впроваджено при визначенні сейсмічної небезпеки майданчиків ряду наявних і проєктованих об'єктів, таких як ГЕС, АЕС, висотні житлові та експериментальні будинки, громадські центри, газоперекачувальні станції тощо.*

**Ключові слова:** сейсмічне мікрорайонування, нелінійні властивості ґрунтів, частотна характеристика, резонансні властивості ґрунтів.

Метою сейсмічного мікрорайонування будівельних майданчиків є прогнозування реакції ґрунтів на можливий інтенсивний землетрус для запобігання значним пошкодженням або руйнуванню будівель і споруд [1, 2]. Незважаючи на велику кількість робіт у цій галузі, прогнозування поведінки ґрунтів під дією сильних сейсмічних впливів залишається однією з найактуальніших проблем інженерної сейсмології. Ступінь пошкодження об'єктів під час землетрусу залежить не лише від рівня сейсмічних впливів, а й від якості сейсмістійкого проєктування та будівництва, а також від сейсмічних властивостей ґрунтів у їх основі. Забезпечити необхідну сейсмістійкість об'єктів мож-

на лише за умови правильного прогнозування кількісних параметрів сейсмічної небезпеки майданчика, що досягається завдяки виконанню комплексу робіт з сейсмічного мікрорайонування [2].

Величину руйнівного ефекту визначають спектральний склад та інтенсивність сейсмічних коливань. У разі інтенсивних сейсмічних впливів проблема оцінки реакції ґрунту істотно ускладнюється, оскільки поведінка ґрунтів стає нелінійною. За таких умов реакція ґрунту залежить як від складу, фізичних параметрів, потужності та водонасиченості ґрунтових шарів, так і від інтенсивності землетрусу, частотного складу коливань у його джерелі та на покрівлі консолідованого фундаменту під майданчиком. При інтенсивних землетрусах може спостерігатися ущільнення і просідання, розпушування і набухання пухких 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 поширюються в ґрунтових шарах. При цьому резонансні частоти, на яких спостерігаються підсилення коливань ґрунтів, виявляються залежними від інтенсивності сейсмічних впливів. При інтенсивних впливах значення резонансних частот можуть помітно знижуватися відносно значень, встановлених у результаті проведення інструментальних досліджень методом реєстрації слабких землетрусів, вибухів і короткоперіодичних мікросейсм. Оцінка резонансних властивостей ґрунтів основана на визначенні їх частотної характеристики, яка є комплексною функцією частоти. Частотна характеристика дозволяє отримати інформацію про зміну в заданому частотному діапазоні інтенсивності коливань на поверхні ґрунтової товщі або у внутрішніх точках середовища.

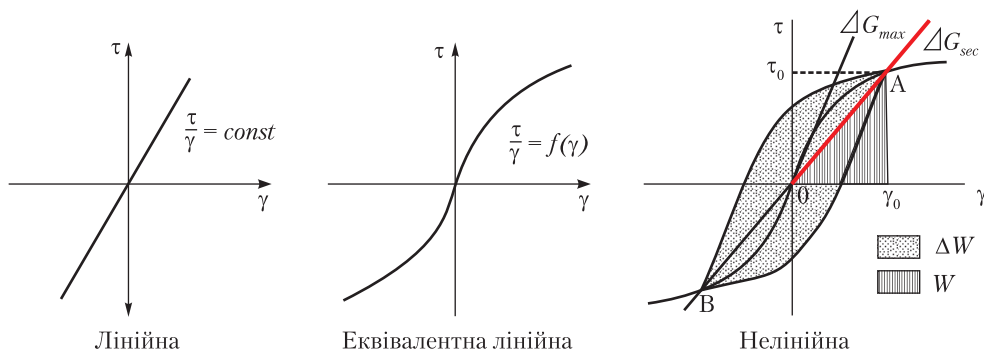
Найточніший метод визначення частотних характеристик ґрунтів потребує реєстрації максимально можливих землетрусів безпосередньо на самому майданчику. В умовах України використання цього методу є практично нереальним через те, що за короткий час, від-

ведений для сейсмологічних досліджень під проектування, одержати записи землетрусів в умовах слабкої і помірної сейсмічності, як правило, не вдається. Інші методи, рекомендовані чинними нормативними документами [1], ґрунтуються на уявленнях про лінійну поведінку ґрунтів при сейсмічних впливах. Нелінійні явища в ґрунтах при цьому не враховуються.

Зростаючі темпи і обсяги будівництва висотних будівель та важливих інженерних споруд потребують освоєння нових територій, які, за експертними оцінками, часто характеризуються складними інженерно-геологічними умовами та погіршеними сейсмічними властивостями. Міста розширюються, освоюючи для забудови території, ґрунти яких зазвичай, згідно з ДБН В.1.1-12:2014, належать до III і IV категорій за сейсмічними властивостями. Такі ґрунти мають помітні нелінійні властивості, які проявлятимуться по-різному, залежно від інтенсивності і частотного складу сейсмічних впливів. З огляду на це, врахування нелінійних властивостей ґрунтів є необхідним. Зазначені вище фактори зумовлюють потребу в удосконаленні методики визначення частотних характеристик ґрунтової товщі з урахуванням її нелінійних властивостей для територій з високою і помірною інтенсивністю прогнозованих сейсмічних впливів, до яких належить значна частина території України. Це й визначає актуальність теми досліджень.

При розрахунку реакції ґрунту на сейсмічні впливи різної інтенсивності відповідальним кроком є вибір ідеалізованої моделі його лінійної або нелінійної поведінки. У світовій практиці для моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи найчастіше розглядають три моделі: лінійну, еквівалентну лінійну та нелінійну. Всі ці моделі спираються на залежності між напруженням і деформацією (рис. 1). Чинні нормативні документи [1] для всього діапазону зсувних деформацій ґрунту передбачають використання лише лінійної моделі.

Якщо припустити, що деформації ґрунту будуть невеликими (нижчі за  $10^{-6}$ ), то виправданим є застосування лінійної (пружної) моделі,



**Рис. 1.** Схематичне представлення узагальнених класів моделей поведінки ґрунтів при сейсмічних впливах

а ключовим параметром для адекватного моделювання буде модуль зсуву  $G$  [3].

У разі деформацій середньої величини ( $10^{-5}$ – $10^{-3}$ ) реакція ґрунту стає в'язко-пластичною і  $G$  зменшується при збільшенні деформації зсуву  $\gamma$ . У процесі навантаження виникає дисипація енергії, яка в ґрунтах має гістерезисний характер. Крива  $G/G_{max}(\gamma)$ , яка показує зменшення модуля зсуву зі зростанням деформації, передає ту саму інформацію, що й скелетна (характеристична) крива. Для оцінки енергопоглинальних властивостей ґрунту використовують безрозмірний коефіцієнт відносного поглинання  $D$ .

Деформації середньої величини не спричинюють прогресуючої зміни властивостей ґрунту, тому  $G$  і  $D$  у цьому випадку не залежать від кількості циклів. Такий різновид реакції ґрунту характеризується наявністю гістерезису «стабільного» типу (non-degraded hysteresis type) [3]. Як аналітичний інструмент у цьому разі використовують еквівалентну лінійну модель, засновану на концепції в'язкої пружності. Припускають, що максимальні зміщення спричинюються поперечними коливаннями, які поширюються вертикально вгору з півпростору. Нелінійну поведінку ґрунту і, відповідно, зміну параметрів  $G$  і  $D$  залежно від зсувної деформації  $\gamma$  при еквівалентному лінійному моделюванні враховують шляхом проведення ітерацій до отримання задовільного розв'язку [4]. Ітеративні обчислення забезпечують відповідність параметрів  $G$  і  $D$

рівням деформацій  $\gamma$  в усіх шарах ґрунтової товщі.

Для зсувної деформації, яка перевищує  $10^{-3}$ , суттєва зміна характеристик ґрунту може бути пов'язана не лише зі збільшенням  $\gamma$ , а й з наявністю повторювань (циклів) навантаження. Такий різновид реакції ґрунту характеризується гістерезисом «прогресуючого» типу (degraded hysteresis type) [3]. Вважається, що величина зміни  $G$  і  $D$  при циклічному навантаженні залежить від величини зміни ефективного напруження всебічного стиску при нерегулярному прикладенні дотичних напружень у 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 найпоширеніших підходів до цього завдання є правило 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. Як аналітичний інструмент у цьому випадку застосовують 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

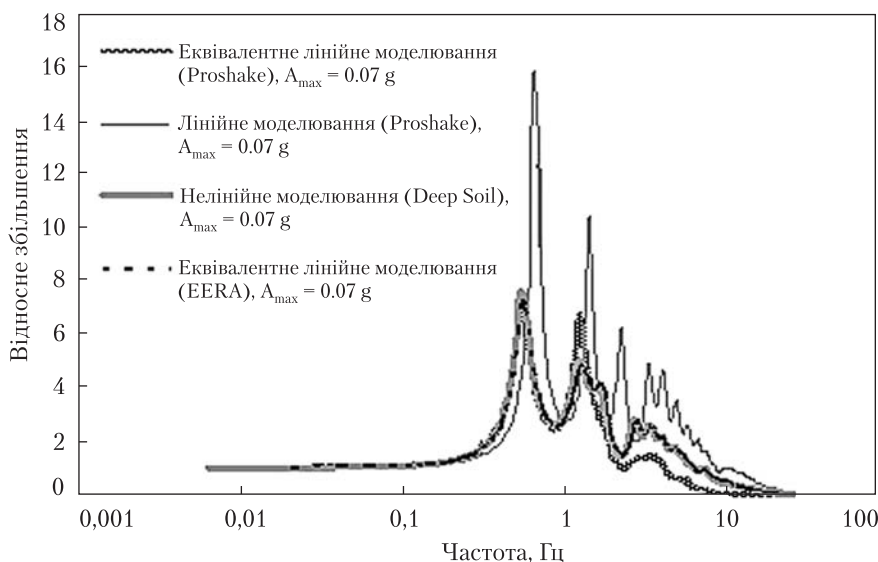
обраної моделі. Нелінійну залежність «напруження–деформація» представляють серією лінійних наближень з малим кроком у часовій області.

Отже, в еквівалентній лінійній і нелінійній моделях можна врахувати нелінійну реакцію ґрунту шляхом застосування емпіричних залежностей модуля зсуву  $G$  і коефіцієнта поглинання  $D$  від величини зсувної деформації  $\gamma$ . Ці залежності отримують у лабораторних або польових дослідженнях у результаті динамічних випробувань ґрунтів. В Україні такі дослідження поки що не проводилися. За результатами детального вивчення робіт закордонних дослідників щодо зміни динамічних параметрів ґрунтів при деформаціях різної величини [5–9 та ін.] створено базу даних залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  для різних типів ґрунтів, характерних для майданчиків на території України, зокрема для майданчиків в містах Києві та Одесі, а також для майданчиків розташування ряду важливих об'єктів на території країни.

Досліджено вплив літологічного складу та фізико-механічних параметрів ґрунту на зменшення модуля зсуву і збільшення коефіцієнта

поглинання. Виділено основні параметри для ефективної апроксимації нелінійних властивостей кожного з шарів моделі ґрунтової товщі відповідними залежностями  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$  зі створеної бази даних. Розроблено методологічний підхід до формування розрахункових сейсмогеологічних моделей ґрунтової товщі шляхом введення залежностей  $G(\gamma)$  і  $D(\gamma)$ , що дозволяє максимально наблизити обчислювані частотні характеристики ґрунтової товщі до реальних і значно підвищити обґрунтованість і точність кількісних параметрів сейсмічної небезпеки на досліджуваних будівельних та експлуатаційних майданчиках. Ці параметри необхідні для розроблення ефективних заходів із забезпечення сейсмостійкості проєктованих і наявних об'єктів.

На рис. 2 наведено амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) ґрунтового середовища під будівельним майданчиком багатоповерхового житлового будинку по вул. Глибочицька в Києві, отриману в результаті лінійного, еквівалентного лінійного і нелінійного математичного моделювання з використанням програмних продуктів PROSHAKE [10], EERA



**Рис. 2.** Амплітудно-частотні характеристики ґрунтового середовища під майданчиком будівництва багатоповерхового житлового будинку в м. Києві по вул. Глибочицька, розраховані для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з максимальним піковим прискоренням  $0,07g$

[11], DEEPSOIL [12] для випадку падіння з нижнього півпростору сейсмічного сигналу з максимальним піковим прискоренням 0,07g.

З рис. 2 видно, що АЧХ, отримані в результаті лінійного моделювання (вважається, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву є сталими величинами для кожного шару незалежно від рівня деформації), істотно відрізняються від результатів, одержаних з урахуванням нелінійності (враховується, що коефіцієнт поглинання і модуль зсуву залежать від рівня деформації). У результатах, отриманих за допомогою лінійного моделювання, спостерігаються більша кількість яскраво виражених піків і значно вищі коефіцієнти підсилення сейсмічних коливань. З урахуванням нелінійних властивостей ґрунтів максимуми АЧХ переміщуються в низькочастотну область, що зумовлено впливом поглинання. Це явище можна пояснити таким механізмом. Нелінійність, пов'язана з неоднорідністю геологічного середовища, трансформує (інакше кажучи, «перекачує») енергію низько- і середньочастотних коливань у високочастотну область, де вона інтенсивно поглинається. На низькочастотні коливання поглинання впливає відносно слабо. Вони поширюються в ґрунтовій товщі без значних енергетичних втрат. Аналогічні ефекти спостерігали також інші дослідники, наприклад [13].

З рис. 2 добре видно, що різні програмні продукти дали подібні результати при еквівалентному лінійному і нелінійному моделюванні. Близькість результатів еквівалентного лінійного і нелінійного моделювання залежить від сейсмічних властивостей ґрунтів і, відповідно, від прояву їх нелінійних властивостей. Обидва методи дають близькі до реальних (отриманих зі спостережень) оцінок реакції ґрунту за невеликих деформацій. Нелінійне моделювання дає кращі результати за великих деформацій. При використанні та інтерпретації результатів розрахунків, одержаних із застосуванням різних методів моделювання реакції ґрунтів на сейсмічні впливи, необхідно враховувати особливості і припущення, які лежать в основі алгоритмів реалізації кожного методу, а також

зважати на обмеження щодо можливості їх застосування.

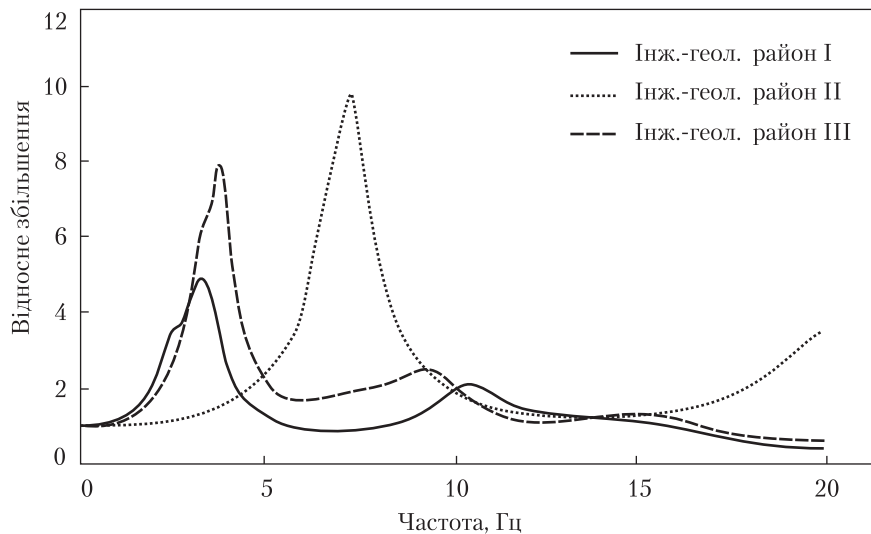
У разі інтенсивних сейсмічних впливів значну роль відіграють нелінійні явища, які особливо сильно проявляються в пухких осадових ґрунтах: супісках, суглинках, водонасичених глинах тощо. Провести чітку межу між поняттями «щільний» і «пухкий» ґрунт досить складно. Велике різноманіття типів ґрунтів, відмінності літологічного складу та фізико-механічних властивостей унеможливають узагальнення законів розвитку нелінійних явищ, що відбуваються в них при значних сейсмічних впливах. Водночас, кожен із методів математичного моделювання реакції ґрунту на сейсмічні впливи має свої обмеження, і його не можна без обґрунтування використовувати в будь-яких сейсмологічних і ґрунтових умовах майданчика. Ці умови мають вирішальне значення при сейсмічному мікрорайонуванні територій, а отже, дослідження їх впливу є актуальним сейсмологічним завданням.

Враховуючи результати досліджень нелінійних та резонансних властивостей ґрунтів, отримані в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, а також досвід використання кожного з методів моделювання [4, 13–15], для цілей сейсмостійкого проектування сформульовано рекомендації щодо використання розрахункових методів лінійного, еквівалентного лінійного та нелінійного моделювання реакції ґрунтової товщі в умовах будівельних майданчиків України:

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 припустиме лише в разі очікуваної максимальної інтенсивності до 8 балів.

3. Для ґрунтової товщі, складеної ґрунтами III і IV категорій, необхідно враховувати їх нелінійні властивості в разі очікуваної інтенсивності від 6 балів включно. Для будівель-



**Рис. 3.** Амплітудно-частотні характеристики ґрунтової товщі під майданчиком на території Южно-Української АЕС

них майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 6–7 балів слід застосовувати еквівалентне лінійне моделювання, а для майданчиків з очікуваною максимальною інтенсивністю 8–9 балів — нелінійне моделювання.

Оскільки, згідно з картами ЗСР-2004 [1], для переважної частини України прогноуються сейсмічні впливи, які не перевищують 6–7 балів, у більшості випадків виправданим є застосування еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

Запропоновану удосконалену методику розрахунку АЧХ ґрунтів з урахуванням нелінійності впроваджено при визначенні сейсмічної небезпеки майданчиків ряду наявних і проєктованих об'єктів, таких як ГЕС, АЕС, висотні житлові та експериментальні будинки, громадські центри, газоперекачувальні станції тощо. На рис. 3 наведено розраховані АЧХ ґрунтової товщі на території Южно-Української АЕС. При сейсмічному мікрорайонуванні територію було умовно розділено на три інженерно-геологічні райони, при побудові АЧХ для яких використовували метод еквівалентного лінійного моделювання реакції ґрунтової товщі на сейсмічні впливи.

З рис. 3 видно, що АЧХ ґрунтового середовища інженерно-геологічного району I характеризується частотним діапазоном резонансного підсилення коливань локальними ґрунтовими умовами від 2,06 до 4,0 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 4,93 і одним чітким максимумом на частоті 3,26 Гц; АЧХ району II — частотним діапазоном від 6,14 до 8,14 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 9,76 і одним чітким максимумом на частоті 7,26 Гц; АЧХ району III — частотним діапазоном від 2,82 до 4,3 Гц з максимальним коефіцієнтом підсилення 7,79 і одним чітким максимумом на частоті 3,68 Гц. Порівнюючи амплітудно-частотні характеристики ґрунтового середовища цих трьох інженерно-геологічних районів, можна дійти висновку, що інженерно-геологічний район I характеризується найбільш низькочастотними власними коливаннями.

Урахування підсилення сейсмічних коливань у діапазоні низьких частот є необхідним для сейсмостійкого проєктування висотних і протяжних споруд, оскільки вони характеризуються низькими власними частотами коливань. Такі об'єкти, розташовані на території України, можуть зазнати пошкодження у

разі сильних підкорових землетрусів із зони Вранча. Сейсмічні впливи від цих землетрусів характеризуються низькочастотними довготривалими коливаннями і поширюються на великі відстані без значного загасання, що може призвести до небезпечних резонансних явищ.

Перевага запропонованої методики полягає в можливості здешевлення сейсмостійкого будівництва завдяки врахуванню вибірковості підсилення ґрунтами сейсмічних коливань на певних частотах, яке істотно змінюється залежно від будови середовища, його нелінійних властивостей та величини сейсмічного впливу.

## REFERENCES

## [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Construction in seismic regions of Ukraine. DBN V.1.1-12:2014. (State Regulatory Document). Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2014.  
[Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН В.1.1-12:2014. К.: Мінрегіонбуд України, 2014.]
2. Kendzera O.V. Seismic hazard and seismic protection in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*. 2015. (3): 9. <https://doi.org/10.15407/ugz2015.03.009>  
[Кендзера О.В. Сейсмічна безпека і сейсмічний захист в Україні. *Укр. географ. журн.* 2015. № 3. С. 9–15.]
3. Ishihara K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. (Oxford University Press, 1996). [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199711\)26:11<1187::AID-EQE663>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11<1187::AID-EQE663>3.0.CO;2-Q)  
[Ишихара К. *Поведение грунтов при землетрясениях*. СПб.: Геореконструкция-Фундаментпроект, 2006.]
4. Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. (Pearson, 1996).
5. Seed H.B., Idriss I.M. *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*. Report UCB/EERC-70/10. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1970.
6. Vucetic M., Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response. *J. Geotech. Eng.* 1991. **117**:89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))
7. Lanzo G., Pagliaroli A., Tommasi P., Chiocci F.L. Simple shear testing of sensitive, very soft offshore clay for wide strain range. *Canadian Geotech. J.* 2009. **46**(11): 1277. <https://doi.org/10.1139/T09-059>
8. Ishibashi I., Zhang X.J. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*. 1993. **33**(1): 182. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.182>
9. Roblee C., Chiou B. A proposed geindex model for design selection of non-linear properties for site response analyses. In: *Proc. Int. Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response*. UC Berkeley, 2004.
10. ProShake Ground Response Analysis Program. Version 1.1. User's Manual. Washington, 1998.
11. Bardet J.P., Ichii K., Lin C.H. EERA: A computer program for equivalent-linear earthquake site response analysis of layered soil deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California. 2000.
12. Hashash Y. DeepSoil User Manual and Tutorial. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. 2012.
13. Aleshin A.S. *Seismic micro zoning of especially important objects*. (Moscow: Svetoch Plus, 2010).  
[Алешин А.С. *Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов*. М.: Светоч Плюс, 2010.]
14. Yoshida N., Iai S. Nonlinear site response and its evaluation and prediction. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*. 1998. P. 71–90.
15. Kumar A., Harinarayan N., Baro O. High amplification factor for low amplitude ground motion: Assessment for Delhi. *Disaster Advances*. 2015. **8**(12): 1.

*Yu. V. Semenova*

Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

#### MODELING OF SOILS RESPONSE UNDER SEISMIC IMPACT FOR ENSURING SEISMIC RESISTANCE OF BUILDINGS ACCORDING TO EUROPEAN STANDARDS

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, May 30, 2018

In the article the task of accounting for resonant and non-linear effects in soils during seismic microzoning of construction and operation sites is solved. The method of determining the resonant properties of soils while accounting for their nonlinearity for the purpose of seismic proof designing of buildings and structures on the construction sites of Ukraine is developed and introduced into practical application. The developed method is based on an analytical-empirical approach for calculating the frequency characteristics of soils. Improved method of constructing of the frequency characteristics of ground is necessary for adjusting the methods of seismic microzoning of areas of buildings and industrial structures placement in seismic regions of Ukraine with the regulatory requirements of European standards "Eurocode-8". The method of calculating the frequency characteristics of soils 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 influences. The construction of seismic calculation models uses strain-dependent shear modulus and damping ratio from the database which comprises the deformation properties of different soil types typical for sites located in Ukraine. The improved method for determining the resonance properties of soils has been implemented in the determination of seismic hazard of sites of a number of existing and projected objects, such as hydroelectric power plants, nuclear power plants, high-rise housing and experimental buildings, public centers, gas transmission stations, etc.

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