

УДК 550.3 (519.21)

О. Кендзера, канд. фіз.-мат. наук,
З. Вижва, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
К. Федоренко, асп., А. Вижва, студ.

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІД БУДІВЕЛЬНИМИ МАЙДАНЧИКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМІЧНОГО ШУМУ НА ПРИКЛАДІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У М. ОДЕСІ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.Є. Кошляковим)

Розглянуто задачу впровадження статистичного моделювання випадкових процесів та полів на площині з рівномірною решіткою інтерполяції в сейсмологічні дослідження для потреб визначення частотних характеристик геологічного середовища під будівельними майданчиками. На основі результатів статистичного аналізу зареєстрованих сейсмічних коливань та оцінок похибок наближення випадкових процесів та полів сформульовано алгоритми для статистичного моделювання таких процесів та полів на основі інтерполяційних розкладів, побудовано моделі для статистичного моделювання адекватних реалізацій сейсмограм шуму у випадках однієї та двох змінних.

The task of implementing the statistical simulation of random processes and fields on the plane with a uniform grid interpolation in seismological research needs to determine the frequency characteristics of the geological environment at construction sites is considered. The algorithms for statistical modeling and fields based on interpolation schedules and based on the results of statistical analysis of seismic waves recorded and estimates of error approximation of random processes and fields are formulated. The models for statistical modeling adequate implementations seismograms noise in the cases of one and two variables are constructed.

Характеристика об'єкта дослідження та його статистичне моделювання. Розглядалися сейсмограми двох пунктів спостережень в Одесі: BUG3 та PNT1. Було відібрано по 9 відрізків шуму із сейсмограм для кожного з цих пунктів. Загальний час запису інформації, з якої обиралися реалізації для аналізу, тривав по 1,5 год

на кожному із пунктів. Повний вектор сейсмічних коливань реєструвалися на компонентах: "схід-захід" – EW, "північ-південь" – NS, та "вертикальним" – Z.

У результаті реєстрування сейсмографом отримано графік руху земної поверхні у вигляді зміни амплітуди коливань з часом (рис. 1).

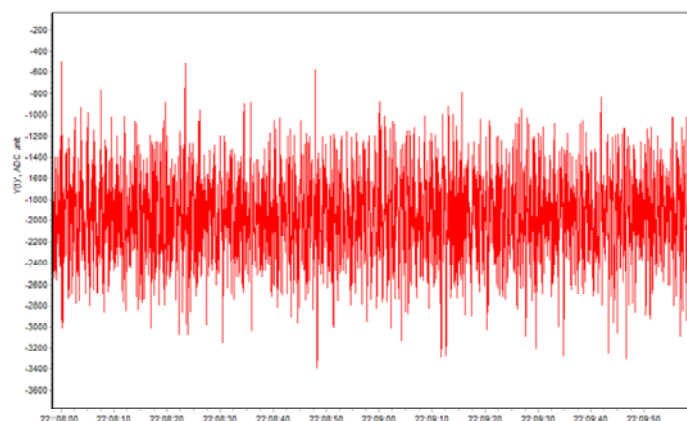


Рис. 1. Зображення сейсмограми мікросейсмічного шуму з тривалістю $t \approx 2$ хв

Аналіз наведеного на рис. 1 графіка дозволяє зробити висновок, що аналізовані дані описують стаціонарний випадковий процес, у якого частоти коливань зосереджені в обмеженому діапазоні. Частотний діапазон залежить від фільтруючих властивостей геологічного середовища під пунктами спостережень.

Для статистичного моделювання спостережених шумів використовувався метод побудови моделі на основі модифікованих інтерполяційних розкладів Котельникова-Шеннона для випадкових процесів з обмеженим спектром на регулярній сітці спостережень [3, 4].

При моделюванні використовувалися наступні значення величин: $T=20$ с – довжина інтервалу спостережень випадкового процесу $\xi(t)$, $\Delta t = T / 2N = 0.01$ с – крок дискретизації Δt спостережень випадкового процесу $\xi(t)$, $2N+1=2001$ – кількість точок спостережень (відліків). Модель сейсмічного шуму, як випадкового процесу, має вигляд:

$$\tilde{\xi}_N(t) = \sum_{k=-1000}^{1000} \tilde{\xi}_k \frac{\sin \frac{\pi}{\Delta t} (t - k\Delta t)}{\frac{\pi}{\Delta t} (t - k\Delta t)}, \quad (1)$$

де $\{\tilde{\xi}_k\}$, $k = \overline{-1000, 1000}$ – послідовність незалежних гауссівських випадкових величин із центрованим середнім значенням і нормованою дисперсією, тобто із статистичними характеристиками, які обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} M\tilde{\xi}_k &= m_k - m = \tilde{m}_k \approx 0, \\ D\tilde{\xi}_k &= \frac{\sigma_k^2}{\sigma^2} = \tilde{\sigma}_k^2; \quad k = \overline{1, 2001}; \end{aligned} \quad (2)$$

де оцінки середнього та дисперсії по всіх реалізаціях для кожного фіксованого вузла t_k окремо для кожного пункту спостережень на конкретній компоненті коливань знаходимо за допомогою співвідношень:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(t_k) &= m_k, \\ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\xi_i(t_k) - m_k)^2 &= \sigma_k^2; \quad n=9; k=1, \dots, 2001, \end{aligned} \quad (3)$$

де $(\xi_i(t_k))$ – значення амплітуди процесу i -тої реалізації сейсмограми шуму $\xi(t)$ в t_k вузлі заданого пункту

на конкретній компоненті), а середнє та дисперсія процесу-шуму визначаються як:

$$\begin{aligned} E\xi(t) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N m_k = m, \\ D\xi(t) &= \frac{1}{Nn-1} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n (\xi_i(t_k) - m)^2 = \sigma^2; \quad n=9; N=2001; \end{aligned} \quad (4)$$

На основі моделі (1), за допомогою алгоритму [3; 4, с. 262], отримано модельні реалізації сейсмограм вихідного шуму у вигляді випадкового процесу $\xi(t)$ в точках $t_i = (i-1)\Delta t$, $t_i \in [0, T]$ ($i = \overline{1, 2001}$) для кожного пункту спостереження на кожній із компонент: EW, NS, та Z. Графік одного із змодельованих масивів значень реалізації випадкового процесу $\xi(t)$, який імітує сейсмограму шуму, наведено на рис. 1 в. Такі реалізації шуму дають можливість отримати важливі відомості про коливальні властивості ґрунту на території будівельних і експлуатаційних майданчиків. Знання цих властивостей необхідні для сейсмостійкого проектування нових будинків і споруд, та забезпечення сейсмостійкості уже існуючих, з метою уникнення небезпечних резонансних ефектів [1, 5]. У модельних сейсмограмах шуму методом статистичного усереднення відфільтровані випадкові збурення, які виникли внаслідок дії випадкових зовнішніх чинників. До таких збурень належать, наприклад, коливання, викликані рухом потяга або важкого автомобіля тощо. Результати змодельованих масивів значень сейсмограм шуму статистичними методами перевірено на адекватність реальним сейсмограмам із пунктів спостережень.

За змодельованим масивом значень реалізації випадкового процесу $\xi(t)$, який імітує сейсмограму шуму, побудовано графік, показаний на (рис. 2).

Статистичний аналіз згенерованої (вихідної) реалізації заданого випадкового процесу $\xi(t)$ продемонстровано на прикладі центрованих та нормованих вхідних даних, зареєстрованих на пункті PNT1 (компонента EW). Гістограми центрованого та нормованого шуму $\tilde{\xi}_N(t)$, зображені на рис. 1 а – вхідної та 1 б – вихідної є взаємно подібними. Це підтверджує адекватність підібраної моделі (1) статистичному характеру розподілу сейсмограм шуму, яка досліджується.

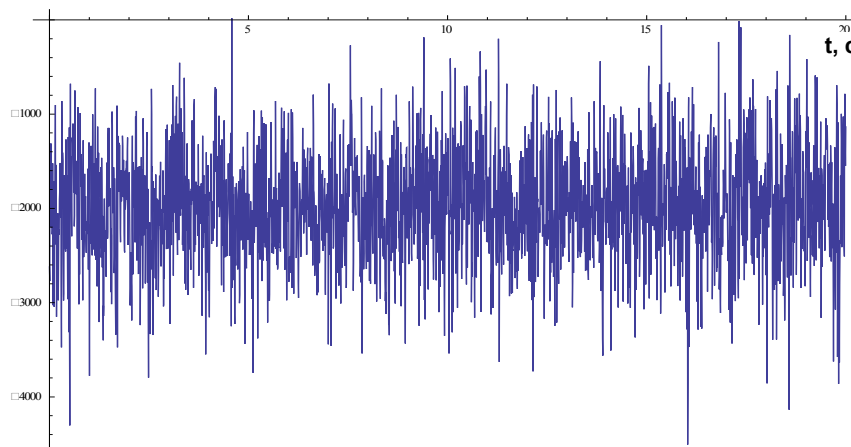


Рис. 2. Модельна сейсмограма шуму тривалістю $t = 20$ с

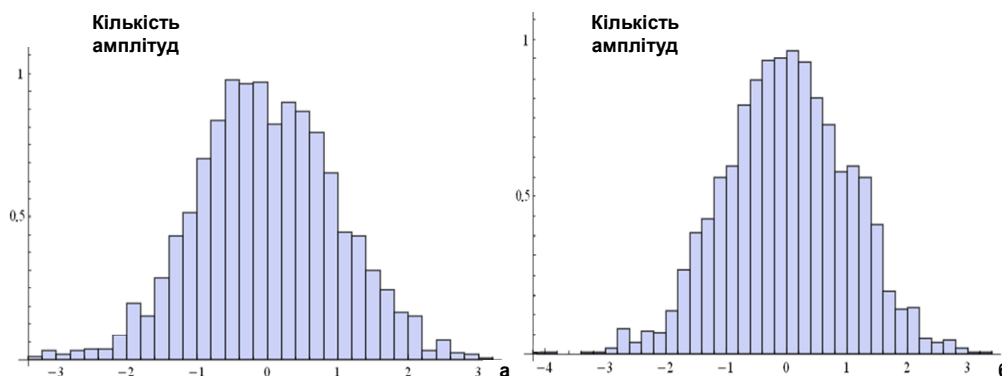


Рис. 3. Гістограми центрованої та нормованої реалізації шуму на пункті PNT1 (компонента EW): а – вхідної та б – вихідної

Із наведених на рис. 3 графіків можна зробити висновок, що побудовані гістограми щільності розподілу для оцифрованої – а та згенерованої – б реалізацій сейсмограм шуму – є достатньо близькими до функції щільності нормального розподілу з однаковими параметрами (одномодальність, симетричність, форма графіка, якою можна наблизити сходящину діаграму).

Методом статистичного моделювання випадкових полів [3, 4] можна також розв'язати важливу проблему моделювання імітованої реалізації вихідної сейсмограми шуму для уявного пункту спостереження, розміщеного між пунктами спостереження BUG3 та PNT1. Амплітудний та фазовий спектри такої реалізації шуму можуть використовуватися для отримання частотних характеристик геологічного середовища під будівельними майданчиками, які описують його здатність, змінювати (збільшувати, чи зменшувати) амплітуди сейсмічних коливань при землетрусах [1, 5]. Чисельне моделювання частотних характеристик ґрунтової товщі, в ряді випадків, може суттєво зменшити вартість робіт з сейсмічного мікрорайонування будівельних майданчиків за рахунок скорочення кількості пунктів інструментальних спостережень за землетрусами, вибухами і мікросейсмами.

Нижче описані результати моделювання реалізації сейсмограми шуму (реалізація випадкового поля $\xi(t, s)$ при значенні просторової координати $s_j = 1/2$, t – час) для уявного пункту спостереження, який знаходиться посередині між пунктами BUG3 та PNT1 для компоненти коливань NS. Для розрахунків використана модель (5) випадкового поля $\xi(t, s)$ шумів сейсмограми, побудована на основі часткової суми модифікованого ряду Котельникова-Шеннона для випадкових полів з обмеженим спектром на регулярній сітці спостережень [3; 4, с. 282]. **Модель випадкового поля шумів** $\xi(t, s)$ ($0 \leq t \leq T$, $0 \leq s \leq S$) має вигляд:

$$\begin{aligned} \xi_N(t, s) = & \sum_{k=-1000}^{1000} \xi_{k,0} \frac{\sin \frac{\pi}{\Delta t}(t-k\Delta t)}{\frac{\pi}{\Delta t}(t-k\Delta t)} \frac{\sin \frac{\pi}{\Delta s}s}{\frac{\pi}{\Delta s}s} + \\ & + \sum_{k=-1000}^{1000} \xi_{k,1} \frac{\sin \frac{\pi}{\Delta t}(t-k\Delta t)}{\frac{\pi}{\Delta t}(t-k\Delta t)} \frac{\sin \frac{\pi}{\Delta s}(s-\Delta s)}{\frac{\pi}{\Delta s}(s-\Delta s)}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\Delta t = T/2N = 0.01$ с – інтервал дискретизації Δt спостережень першої змінної випадкового поля $\xi(t, s)$, де t – час; $\Delta s = 1$ – інтервал дискретизації Δs спостережень другої змінної випадкового поля $\xi(t, s)$, тобто відстані s між пунктами; $\{\xi_{k,0}\}, \{\xi_{k,1}\}$ $k = -1000, 1000$ –

послідовності змодельованих значень амплітуди шуму на заданій компоненті коливань для пунктів спостереження BUG3 та PNT1, відповідно, є незалежними гаусівськими, випадковими величинами із такими статистичними характеристиками:

$$\begin{aligned} M_{\xi_{k,j}} &= m_{k,j} - m_j = \bar{m}_{k,j} \approx 0, \\ D_{\xi_{k,j}} &= \frac{\sigma_{k,j}^2}{\sigma_j^2} = \bar{\sigma}_{k,j}^2; \quad k = \overline{1, 2001}; j = 0, 1; \end{aligned} \quad (6)$$

де оцінка середнього та дисперсії по всіх реалізаціях окремо для кожного фіксованого вузла t_k , та окремо на кожному пункті i на певній компоненті коливань визначається за допомогою виразів:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i(t_k, s_j) = m_{k,j}, \quad \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\xi_i(t_k, s_j) - m_{k,j})^2 = \sigma_{k,j}^2;$$

$$n = 9; k = 1, \dots, 2001; j = 0, 1;$$

де $\xi_i(t_k, s_j)$ – значення амплітуди процесу i -тої реалізації сейсмограми шуму $\xi_i(t, s)$ в t_k -му вузлі j -го пункту спостереження на заданій компоненті, а середнє та дисперсія процесу-шуму в кожному із пунктів на певній компоненті обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} E\xi_j(t) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N m_{k,j} = m_j, \\ D\xi_j(t) &= \frac{1}{Nn-1} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n (\xi_i(t_k, s_j) - m_j)^2 = \sigma_j^2; \end{aligned}$$

$$n = 9; N = 2001; j = 0, 1;$$

Для змодельованої за наведеною моделлю (6) центрованої та нормованої реалізації сейсмограми шуму (реалізація випадкового поля при $s_j = 1/2$) для уявного пункту спостереження, який знаходиться посередині між пунктами BUG3 та PNT1 на компоненті N побудовано гістограму зображену на рис. 4.

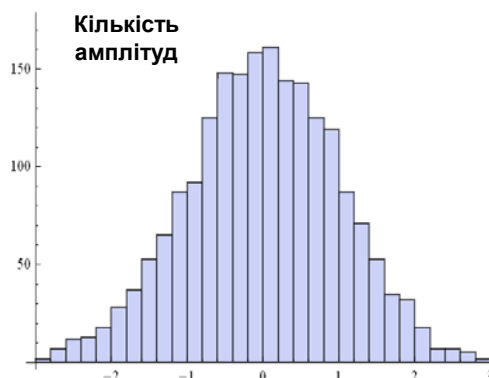


Рис. 4. Гістограма вихідної центрованої та нормованої реалізації (реалізація випадкового поля при $s_j = 1/2$) для пункту спостереження між BUG3 та PNT1 на компоненті NS

Наведена на рис. 4 гістограма масиву реалізації випадкового поля сейсмограми шуму при $s_j=1/2$ вказує на подібність параметрів гауссівського розподілу до наведених на рис. 3а, 3б, гістограм двох центрованих та нормованих масивів вхідних сейсмограм шумів. Статистичний аналіз згенерованої реалізації випадкового поля, імітуючого сейсмограму шуму при $s_j=1/2$, підтверджує її адекватність вхідним даним.

Спектральний аналіз виділеного та згенерованого шуму. Оцінки частотних характеристик геологічного середовища в пункті спостереження (наприклад, під будівельними майданчиками) були отримані шляхом розрахунку та побудови графіків амплітудного та

фазового спектрів шумів в сейсмограмах пунктів спостережень, що розглядаються. Розрахунки проводилися прямим способом [4, с. 179] з використанням методу періодограм.

На рис. 5а та 5б наведено графіки амплітудного спектру $|S(\omega)|$ на компоненті Z для сейсмограм шуму на пунктах спостереження BUG3 та PNT1, а на рис. 5в – амплітудний спектр вихідної змодельованої реалізації шуму для пункту спостереження, розміщеного на рівновіддаленій відстані між пунктами BUG3 та PNT1.

Графіки амплітудних спектрів $|S(\omega)|$ на компоненті – NS зображені на рис. 6а, 6б та 6в.

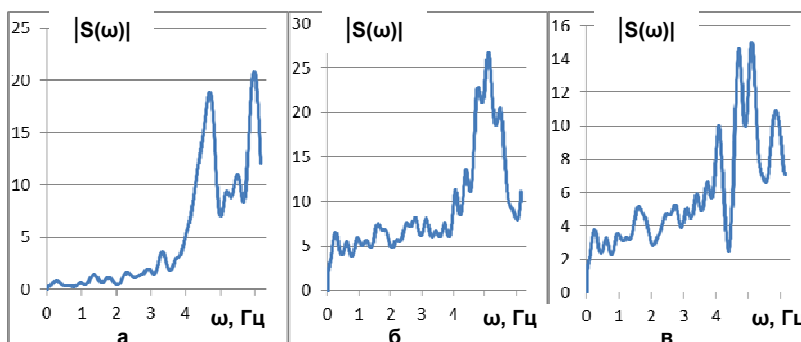


Рис. 5. Графіки амплітудних спектрів $|S(\omega)|$ усереднених даних вхідних масивів шуму на компоненті Z для пунктів: а – BUG3 та б – PNT1; в – амплітудний спектр $|S(\omega)|$ вихідної змодельованої реалізації шуму для пункту спостереження, розміщеного на рівновіддаленій відстані між BUG3 та PNT1

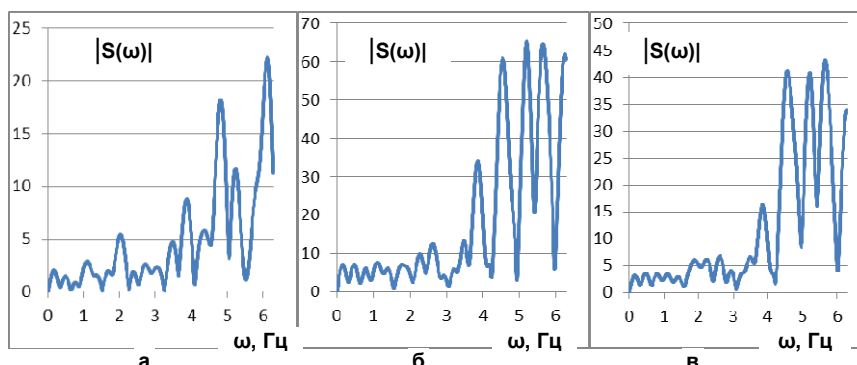


Рис. 6. Графіки амплітудних спектрів $|S(\omega)|$ усереднених даних вхідних масивів шуму на компоненті NS для пунктів: а – BUG3; б – PNT1; в – амплітудний спектр $|S(\omega)|$ вихідної змодельованої реалізації шуму для пункту спостереження, розміщеного на рівновіддаленій відстані між BUG3 та PNT1

Спектральні методи, які використовують частоту в якості незалежного параметра, дозволяють отримати інформацію про будову і фільтруючі властивості верхньої частини земної кори, оскільки будь яке середовище є фільтром, який, завдяки резонансним ефектам та реверберації, сприяє збільшенню амплітуди коливань на одних частотах і зменшує амплітуди – на інших [4, с. 270]. Вміння моделювати ефекти, що залежать від амплітудних і фазових частотних характеристик геологічного середовища, яке знаходиться під різними пунктами будівельних і експлуатаційних майданчиків, дозволяє вивчати особливості геологічних розрізів і передбачати місця, в яких можливе значне зростання інтенсивності сейсмічних струшувань, пов'язане з резонансними ефектами і інтерференційними вузлами поля коливань.

Серед багатьох способів виключення впливу різноманітних факторів, від яких залежить форма спектра сейсмічних коливань при землетрусах, вибухах і мікросейсмах, крім обумовлених впливом лише верхньої частини розрізу земної кори, слід відзначити спосіб,

який базується на використанні відношень вертикальної компоненти спектрів $|S_z(\omega)|$ до горизонтальної $|S_N(\omega)|$. Сектри необхідно обчислювати для однієї і тієї ж хвили. Таке відношення називається спектральним відношенням земної кори $T(\omega)$.

$$|S_z(\omega)| / |S_N(\omega)| = T(\omega)$$

Відношення $T(\omega)$ не залежить від спектра падаючих сейсмічних хвиль, а визначається виключно будовою геологічного середовища під досліджуваним пунктом. На рис. 7а та 7б наведено графіки передавального відношення $T(\omega)$ земної кори, побудовані за відношенням амплітудних згладжених спектрів сейсмограм спостереженого шуму на компоненті Z до аналогічних спектрів на компоненті коливань NS для пунктів спостереження BUG3 та PNT1 відповідно. А на рис. 7в – графік передавального відношення амплітудних спектрів змодельованої реалізації шуму на компоненті Z – до аналогічних спектрів змодельованої реалізації шуму на компоненті NS для пункту спостереження, рівновіддаленого до пунктів BUG3 та PNT1.

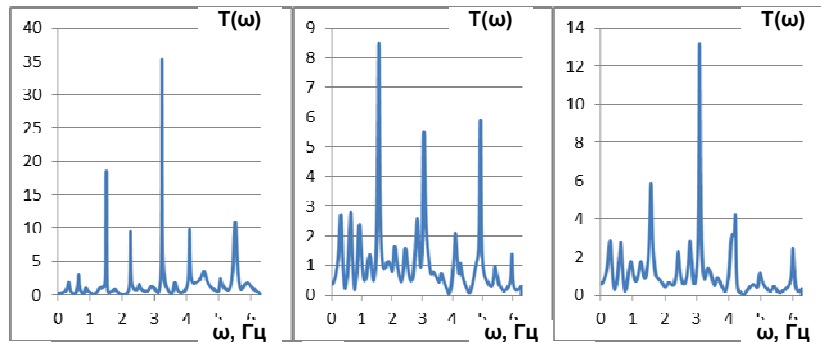


Рис. 7. Графіки передавального відношення $T(\omega)$ амплітудних згладжених спектрів усереднених вхідних даних масивів шуму на компоненті Z до аналогічних величин на компоненті коливань NS для пунктів: а – BUG3; б – PNT1; в – вихідної, змодельованої реалізації шуму для пункту спостереження, розміщеного на рівновіддаленій відстані між BUG3 та PNT1

Інтерпретація передавального відношення земної кори для даних спостережень проводиться шляхом їх порівняння із теоретичними відношеннями, які обчислюються для відомих моделей верхньої частини розрізу земної кори. З метою внесення мінімальних похибок, як правило, розглядаються горизонтально шаруваті, вертикально-неоднорідні моделі геологічного середовища. Для більш складних моделей розрахунок частотних характеристик виконується скінченно-різницевиими та скінченно-елементними методами [2].

Одним із інструментів для оцінки впливу верхньої частини геологічного розрізу на сейсмічні рухи є метод Накамури H/V або QTS (Quasi-Transfer Spectra), розроблений японським вченим Yutaka Nakamura. Метод використовує записи мікросейсмічного шуму, зареєстровані на горизонтальних і вертикальних компонентах коливань з використанням свердловинних досліджень, для побудови квазі-передвального спектру ґрунтової товщі [7, 8]. Метод Накамури дозволяє за відношенням спектрів горизонтальної та вертикальної компонент природних шумів визначити власні резонансні частоти ґрунтової товщі. Максимальні значення відношення спектрів горизонтальної до вертикальної компонент мікросейсми пояснюються багатократним відбиттям SH хвилі.

Наведені графіки $T(\omega)$ – передавального відношення амплітудних згладжених спектрів для кожного із пунктів спостереження BUG3, PNT1 та для пунктів, розміщених між ними, можуть використовуватися для визначення приросту сейсмічної бальності на різних ділянках будівельного майданчика, відносно еталонного, в якості якого в даній роботі виступає пункт PNT1.

Висновки. Графіки на рис. 5а та 5б – адекватні графіку 5в амплітудного спектру $|S(\omega)|$ змодельованої реалізації сейсмічного шуму для пункту спостереження, рівновіддаленого від пунктів BUG3 та PNT1 на компоненті Z. Аналіз спектрів, зображених на рис. 5а, 5б і 5в показує, що в пункті PNT1 на інтервалі відносно низьких частот (приблизно від 4,5 до 5,5 Гц) амплітуди коливань в шумі збільшуються, у порівнянні з пунктом BUG3, що може пояснюватися наявністю тріщин в пористому ґрунті [4, с. 289]. Однак, цей ефект проявився дуже слабо на вихідному спектрі, зображеному на рис. 5в, з огляду на що, зазначене припущення вимагає додаткової емпіричної перевірки, шляхом синхронної реєстрації мікросейсмічного шуму на пунктах BUG3, PNT1 та гіпотетичному пункті, рівновіддаленому від них.

1. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. – М., 1980.
2. Вербицкий С.Т., Рожок Н.І. та ін. Метод Накамури та метод скінченних елементів при дослідженні АЧХС // Геодинаміка. – 2011. – № 2. – С. 38-40.
3. Вижева З.О. Статистичне моделювання випадкових полів на площині з рівномірною решіткою інтерполяції // Доповіді НАН України. – 2003. – № 5. – С. 7-12.
4. Вижева З.О. Статистичне моделювання випадкових процесів та полів. – К., 2011.
5. Кендзера А.В., Стародуб Г.Р., Стародуб Ю.П. О методике изучения строения земной коры по записам объемных волн от удаленных землетрясений // Сейсмопрогностические исследования на территории УССР. – К., 1988.
6. Higgins J.R. Sampling Theory in Fourier and Signal Analysis. – Oxford-New York, 1996.
7. Nakamura Y.A. Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface // Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute. – 1989. – V. 30, No. 1.
8. Vulnerability investigation of Roman Colosseum using Microtremor / Nakamura Y., Gurler E.D., Sanita J. et al. // Proceedings 12th WCEE 2000. – Auckland, 2000. – P. 1-8.

Надійшла до редколегії 28.11.12