

УДК 550.340

А. Р. ГНИП

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 3-б, тел. +38(032)2648563, ел. пошта gnypr@cb-igph.lviv.ua

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПІД СЕЙСМІЧНИМИ СТАНЦІЯМИ “ТРОСНИК”, “УЖГОРОД” І “МІЖГІР’Я”

Мета. У роботі експериментальні спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень у коливаннях, збуджених місцевими землетрусами і шумами, зареєстрованими сейсмічними станціями Ужгород, Тросник і Міжгір’я (частотні характеристики середовища під станціями), порівнюються з обчисленими теоретично за швидкісними моделями, побудованими на основі даних буріння у приповерхневих шарах; оцінюється ступінь збігу резонансних частот і перспектива використання експериментальних і теоретичних частотних характеристик у регіональних сейсмологічних дослідженнях. **Методика.** Теоретичні спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні ідеально-пружного горизонтально-шаруватого півпростору для джерела у вигляді плоскої поздовжньої хвилі обчислювалися з використанням алгоритму, побудованого на основі матричного методу, і порівнювалися з експериментальними, обчисленими за відрізками записів малих землетрусів і шумів, виправлених за вплив сейсмографа, довжина яких обиралася такою, щоб забезпечити відсів глибинних фаз, можливо не врахованих під час обчислення теоретичних співвідношень через недостатню загальну товщину моделей, а також фаз, утворених падінням прямих поперечних хвиль від джерела. Ступінь збігу між частотними характеристиками оцінювався обчисленням функції взаємної кореляції. **Результати.** Найвищі ступені взаємної кореляції виявлено між експериментальними частотними характеристиками середовища під сейсмічними станціями Карпатської мережі, обчисленими за записами місцевих землетрусів, й теоретичними характеристиками для горизонтальних фазових швидкостей, що відповідають швидкостям вступів поздовжніх хвиль на станціях від землетрусів. Про не випадковість збігу можна судити за величиною максимумів функції, яка досягала $\sim 0,8$ і більше, і з огляду на невелике зміщення відповідних максимумів по частоті, $\sim 0,2$ Гц і менше. Це може свідчити, з одного боку, як про адекватність моделей, побудованих за даними буріння, використаних для обчислення теоретичних частотних характеристик, так і про придатність експериментального співвідношення для оцінювання резонансних частот середовища під станціями, де дані буріння відсутні, з іншого. Виявлено також і високі ступені кореляції між експериментальними спектральними співвідношеннями між компонентами записів малих землетрусів на станціях і співвідношеннями для шумів, що уможливило використання саме останніх для оцінювання резонансних властивостей середовища. **Наукова новизна.** Уперше інтерференційні резонансні властивості приповерхневих шарів середовища під сейсмічними станціями Міжгір’я, Тросник і Ужгород оцінено з використанням двох альтернативних підходів – обчислення теоретичного спектрального співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні за моделями, побудованими за даними буріння, та визначення експериментального співвідношення за компонентами записів малих землетрусів і шумів на цих станціях. Доведено збіжність результатів цих підходів та доцільність їхнього використання в сейсмологічних дослідженнях у Карпатському регіоні. **Практична значущість.** Частоти інтерференційних резонансів у шаруватому середовищі під сейсмічними станціями необхідно враховувати під час оцінювання впливу середовища на записи сейсмічних сигналів на станціях, оцінюванні параметрів можливого сейсмічного впливу тощо. Запропоновано надійні й ефективні методи оцінювання цих частот і товщин поверхневих шарів за допомогою теоретичного моделювання частотних характеристик середовища і їхнього експериментального визначення за записами землетрусів і шумів на станціях.

Ключові слова: шарувате середовище, частотна характеристика, метод Накамури, матричний метод, резонансні частоти, інтерференція.

Вступ

Шари неконсолідованих осадов (там де вони є) утворюють дуже контрастну сейсмічну границю з набагато щільнішими і міцнішими породами фундаменту, таким чином найістотніше впливаючи на результати сейсмологічних спостережень на поверхні [Nakamura, 1989]. Без урахування товщини й інтерференційних резонансних

властивостей поверхневих шарів неможливо взятися цілком коректно навіть до таких рутинних, на перший погляд, завдань сейсмологічних досліджень як визначення розташування вогнищ землетрусів (особливо місцевих), їхньої сили, спектральних характеристик вогнищ тощо. Товщину поверхневих шарів важливо знати під час вивчення будови земної кори та місцевої тектоніки, оскільки деконволюція їхнього впливу дає змогу

перейти до визначення параметрів шарів, що залягають глибше. Визначення інтерференційних резонансних частот поздовжних і поперечних хвиль у шарах неконсолідованих осадових є необхідною умовою і під час вирішення багатьох інших завдань, таких, зокрема, як оцінювання параметрів можливого сейсмічного впливу – адже у разі збігу цих частот з частотами власних коливань споруди можуть виникати явища резонансного підсилення і руйнування. Протягом останнього часу з'являється дедалі більше прикладів використання з метою визначення резонансних частот і товщини поверхневих шарів спектрального співвідношення між горизонтальною та вертикальною компонентами поля переміщень на вільній поверхні, збудженого слабкими джерелами (малі землетруси/шум), або т.зв. методу Накамури [Nakamura, 1989].

Можна показати, що спектральне співвідношення між компонентами переміщень на вільній поверхні залежить лише від параметрів ідеально пружного горизонтально-шаруватого середовища, якщо джерелом коливань є плоска хвиля [Вербицкий и др., 1985; Starodub, Gnyr, 1999; Гнип, 2015], і власне з огляду на це співвідношення ще часто називають частотною або передавальною характеристикою середовища (*quasi-transfer spectrum, QTS* – [Nakamura, 1989]). Попри те, що джерела коливань (шуми, малі землетруси) у методі Накамури мають складнішу – і часто до кінця не з'ясовану – природу, довголітня практика його використання довела ефективність методу, яка у поєднанні з простотою і дешевизною, визначає його велику поширеність (див., зокрема, багатий перелік посилань у [Nishitsuji et al., 2014]). У попередній роботі [Гнип, 2015], в методичному аспекті, оцінено ступінь збігу інтерференційних резонансних частот, прогнозованих у шарі на півпросторі за методом Накамури [Nakamura, 1989], а також у роботах [Tsai, 1970] і [Ibs-von Seht, Wohlenberg, 1999], з отриманими через обчислення повного хвильового поля, збудженого поздовжньою плоскою хвилею, з використанням матричного методу [Вербицкий и др., 1985; Starodub, Gnyr, 1999]. Перевагою останнього є те, що за його допомогою – у разі відомих параметрів горизонтально-шаруватого середовища – можливо виявити резонанси, сформовані інтерференцією хвиль у більшій кількості шарів. У роботах [Гнип, 2012, 2015] було, зокрема, обчислено горизонтальні спектральні частотні характеристики середовища під трьома станціями Карпатської мережі (Ужгород, Тросник, Міжгір'я – UZH, TRSU, MEZU, див. рис. 1 у [Гнип, 2015]), за моделями, побудованими з використанням даних неглибокого (до перших кількох сотень метрів) буріння, проведеного поблизу станцій у минулі роки.

Мета

У роботі експериментальні спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень у коливаннях, збуджених місцевими землетрусами і шумами, зареєстро-

ваними сейсмічними станціями Ужгород, Тросник і Міжгір'я (частотні характеристики середовища під станціями), порівнюються з обчисленими теоретично з використанням матричного методу за моделями, побудованими на основі даних буріння у приповерхневих шарах; оцінюється ступінь збігу резонансних частот і перспектива використання експериментальних і теоретичних частотних характеристик у регіональних сейсмологічних дослідженнях.

Методика

Оскільки теоретичні спектральні співвідношення між горизонтальною та вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні горизонтально-шаруватого середовища ($u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$) обчислювалися в [Гнип, 2015] для джерела у вигляді поздовжньої плоскої хвилі для забезпечення коректності порівняння для обчислення експериментальних співвідношень використовувалися відрізки записів місцевих землетрусів з початком безпосередньо перед вступом поздовжньої хвилі і довжиною лише 3 с, що мало забезпечити відсів фаз, збуджених прямими поперечними хвилями, а також тих, що зазнали конверсії і відбиття на глибших сейсмічних границях, оскільки загальна товщина моделей, побудованих за даними буріння поблизу сейсмічних станцій, за якими обчислювалися теоретичні співвідношення, не перевищувала перших кількох сотень метрів. Використання саме місцевих землетрусів для обчислення експериментальних співвідношень зумовлене тим, що з огляду на меншу горизонтальну фазову швидкість (і відповідно більший кут падіння), ніж у землетрусах на більших епіцентральных відстанях у відрізках, що відповідають вступові поздовжньої хвилі від них (вертикальна складова) можна очікувати на більшій амплітуді (виразніші) фази хвиль, конвертованих у поперечні (горизонтальна складова). Під час обчислення експериментальних співвідношень для станцій Ужгород і Міжгір'я використано записи землетрусу 23.11.2006 поблизу м. Берегове (07°15'18,7^s; 48,20 °N, 22,52 °E; h = 12,3 км; M3,9; епіцентрально відстань відповідно – 51 і 82 км [Сейсмологический, 2008]; горизонтальна фазова швидкість вступів поздовжньої хвилі на обох станціях – 5,5 км/с). Для станції Тросник використано землетрус 31.03.2006 поблизу м. Мукачеве (04°53'53,1^s; 48,49 °N, 22,73 °E; h = 4,9 км; M1,5; епіцентрально відстань ~48 км [Сейсмологический, 2008], горизонтальна фазова швидкість вступу Р-хвилі – 4,5 км/с). Експериментальні співвідношення обчислювалися також і з використанням відрізків шумів довжиною 3 с, на записах тих самих землетрусів безпосередньо перед першими вступами. Усі три складові відібраних експериментальних записів виправлялися за вплив сейсмографа через деконволюцію частотної характеристики приладу (ділення на її амплітудний спектр (рис. 1) у частотній ділянці). Лише після того обчислювалася повна горизонтальна складова переміщень і спектральне співвідношен-

ня між нею і вертикальною складовою. Отримані у результаті цієї процедури вкрай нерегулярної форми дискретні ряди згладжувалися з використанням т.зв. нормалізації абсолютного середнього у ковзаючому вікні (*running-absolute-mean normalization* – [Bensen et al., 2007; Nishitsuji et al., 2014]). Кожен відлік ряду u_i ділять на вагу w_i , обчислювану за формулою

$$w_i = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=i-N}^{k=i+N} |u_k|,$$

отримуючи таким чином нормалізований ряд $\tilde{u}_i = u_i / w_i$. Ширина вікна при цьому визначає кількість первинної інформації, що зберігається у кожному з відліків після нормалізації (що більша ширина – то менше інформації). У нас повна ширина вікна становила еквівалент 1 Гц.

Варіанти теоретичного спектрального співвідношення між горизонтальною і вертикальною складовими переміщень на вільній поверхні ($u_x^{(0)} / u_z^{(0)}$) для горизонтально-шаруватих моделей середовища під станціями Міжгір'я, Тросник і Ужгород, побудованих у [Гнип, 2015] для швидкостей поздовжніх хвиль за даними буріння, обчислювалися за допомогою алгоритму [Starodub, Гнур, 1999], розробленого на основі матричного методу [Вербицкий и др., 1985], для джерела у вигляді плоскої поздовжньої хвилі, що падає на нижню границю пачки шарів з глибини нижнього півпростору під трьома різними кутами. Фіксованим значенням горизонтальної фазової швидкості плоскої хвилі ~5, 11 і 31 км/с відповідали – з урахуванням значення v_p у нижньому півпросторі кожної з моделей – кути падіння в діапазоні від ~43 до 5 градусів.

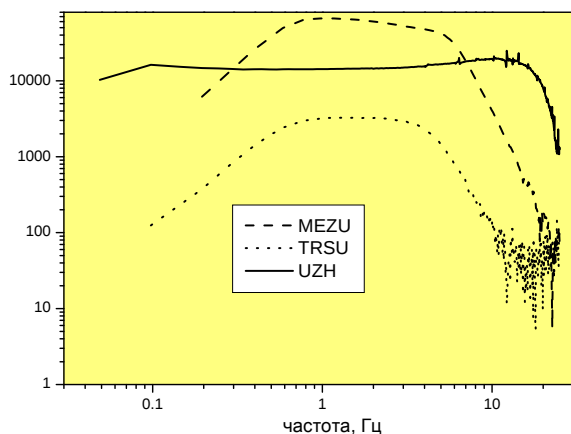


Рис. 1. Експериментальні амплітудні спектри підсилення за швидкістю давачів вертикального каналу на сейсмічних станціях Міжгір'я (MEZU), Тросник (TRSU) – давачі типу CM3-KB [Аранович и др., 1996], і Ужгород (UZH) – типу СКД

Fig. 1. Experimental spectra of velocity amplification of vertical sensors at seismic stations Mizhgirya (MEZU), Trosnyk (TRSU) – sensors of CM3-KB type [Aranovich et al., 1996], and Uzhgorod (UZH) – СКД

Необхідність обчислення теоретичних співвідношень для різних кутів падіння зумовлювалася тим, що заздалегідь невідомо було в околі якого з них потужність шумів, за якими обчислювалися експериментальні співвідношення, буде найбільша. Густина шарів у моделях апроксимувалися з використанням квадратичної залежності від швидкостей поздовжніх хвиль [Starodub, Гнур, 1999; Гнип, 2015], а швидкості поперечних хвиль – з використанням лінійного співвідношення з коефіцієнтом 1,7.

Результати

Ступінь збігу між теоретичними й експериментальними кривими спектрів $u_x^{(0)} / u_z^{(0)}$ оцінювався через обчислення функції взаємної кореляції між ними. На станції Міжгір'я найкраще корелювали між собою експериментальне співвідношення для землетрусу і теоретичне, обчислене для моделі MEZU (рис. 2) за горизонтальної фазової швидкості 5 км/с, близької за значенням до фазової швидкості *P*-хвилі від землетрусу (рис. 3, 4). Пік кореляційної функції між ними становив більше ніж 0,8 з мінімальним зсувом по частоті. Найкраще збігалися максимуми співвідношення (резонанси *S*-хвилі) у ділянці довкола 6 і 10 Гц і мінімуми (резонанси *P*-) довкола 7 і 15 Гц (рис. 3).

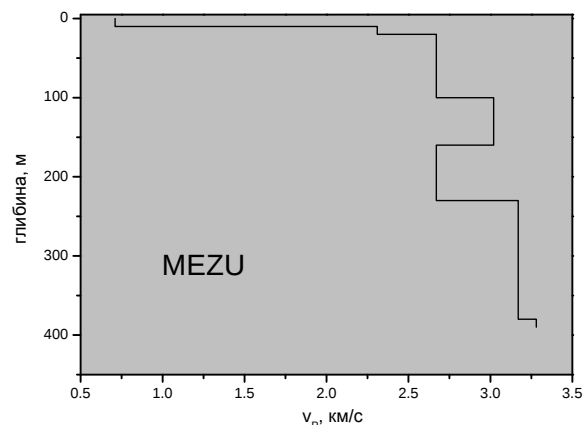


Рис. 2. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією Міжгір'я (MEZU)
Fig. 2. Velocity model under the station Mizhgirya (MEZU)

Найамплітудніші резонанси *S*- і *P*-хвиль (28,7 і 50,8 Гц) у теоретичному спектральному співвідношенні для моделі MEZU, зумовлені найконтрастнішим ($v_p \sim 0,71$ км/с) і найтоншим (до 10 м) поверхневим шаром глин, виявлені в [Гнип, 2015], опинилися зовсім за верхньою межею (20 Гц) частотного діапазону, досліджуваного у роботі, як зрештою і робочого діапазону апаратури, встановленої на станції (рис. 1). У нижній частині частотного діапазону (у межах робочої ділянки приладів) теоретичні співвідношення для різного кута падіння плоскої хвилі мало відрізнялися

(рис. 3). Зміщення мінімуму (резонансу P -) в околі 17–18 Гц за малих кутів падіння (горизонтальні фазові швидкості 11 і 31 км/с) до ~20 Гц за найбільшого кута (швидкість 5 км/с) можна пояснити відповідним збільшенням вертикальної фазової швидкості (шари моделі для хвилі стають ніби “тоншими”). У методичному аспекті – стосовно перспективи використання експериментальних спектральних співвідношень – варто відзначити і високий ступінь взаємної кореляції між співвідношеннями для шуму і для землетрусу (рис. 4). Невелике зміщення піку кореляції між ними може зумовлюватися впливом ділянки спектрального співвідношення для шуму на частотах від 0 до 4 Гц, що має вигляд полички.

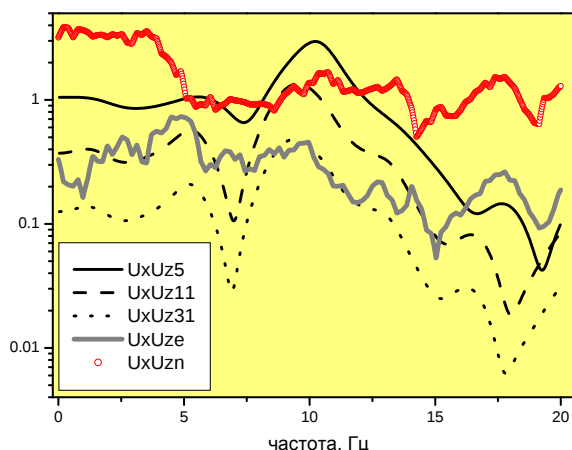


Рис. 3. Теоретичні спектральні співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі MEZU за горизонтальної фазової швидкості 5, 11 і 31 км/с ($UxUz5$, $UxUz11$, $UxUz31$) й експериментальні співвідношення за записами землетрусу і шуму ($UxUze$, $UxUzn$)

Fig. 3. Synthetic spectral ratios $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model MEZU at horizontal phase velocities of 5, 11 and 31 km/s ($UxUz5$, $UxUz11$, $UxUz31$), and experimental ratios calculated using the records of earthquake and noise ($UxUze$, $UxUzn$)

Численні (і майже строго періодичні й однакової амплітуди) резонанси S - і P -хвиль у теоретичному спектральному співвідношенні $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі TRSU (рис. 5) формуються лише одним відносно товстим (~120 м) шаром глинисто-галькової суміші з дуже малою швидкістю v_p (~ 0,7 км/с) і мало залежать від кута падіння через майже вертикальне заломлення хвиль у цьому шарі (рис. 6). За характером (якісно) експериментальні співвідношення для землетрусу і шуму дуже схожі на теоретичні (виразною періодичністю і приблизно однаковим рівнем амплітуд резонансних піків, рис. 6, 7). Кількісно цю періодичність добре видно на графіку функції взаємної кореляції між теоретичним спектральним співвідношенням для

фазової швидкості 31 км/с і відповідним співвідношенням для землетрусу (рис. 8). У межах усього частотного діапазону (до 20 Гц) максимум функції взаємної кореляції між співвідношеннями (~ 0,73) зміщений менш ніж на 0,2 Гц, що може бути вагомим аргументом на користь не випадкового характеру їхньої схожості.

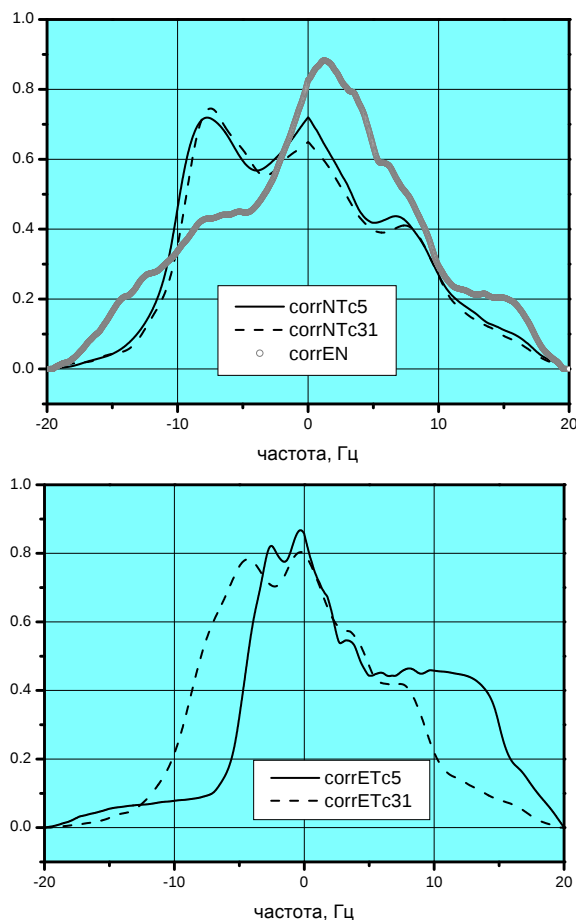


Рис. 4. Функції взаємної кореляції (лінійна кореляція)

$corrNTc5$, $corrNTc31$ – між теоретичними спектральними співвідношеннями $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі MEZU за фазових швидкостей 5 і 31 км/с й експериментальним співвідношенням для шуму; $corrEN$ – між експериментальними спектральними співвідношеннями для землетрусу і шуму; $corrETc5$, $corrETc31$ – між теоретичними співвідношеннями за фазових швидкостей 5 і 31 км/с й експериментальним співвідношенням для землетрусу

Fig. 4. Cross-correlation functions (linear correlation)

$corrNTc5$, $corrNTc31$ – between synthetic spectral ratios $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model MEZU at horizontal phase velocities of 5 and 31 km/s, and experimental ratio calculated using the records of noise; $corrEN$ – between experimental spectral ratios calculated using the records of earthquake and noise; $corrETc5$, $corrETc31$ – between synthetic spectral ratios for horizontal phase velocities of 5 and 31 km/s, and experimental ratio calculated using the records of earthquake

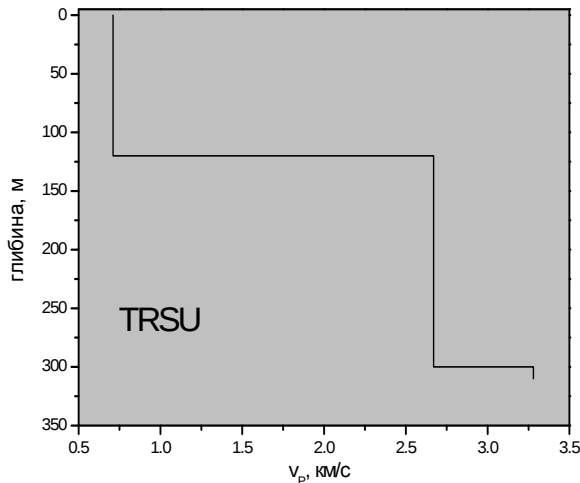


Рис. 5. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією Тросник (TRSU)
Fig. 5. Velocity model under the station Trosnyk (TRSU)

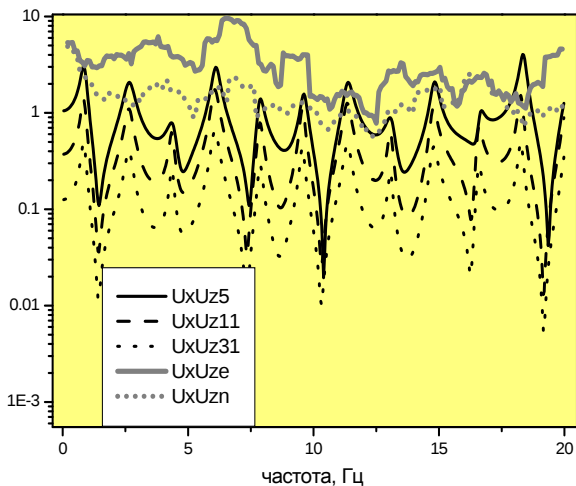


Рис. 6. Теоретичні спектральні співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$

для моделі TRSU за горизонтальної фазової швидкості 5, 11 і 31 км/с (UxUz5, UxUz11, UxUz31) й експериментальні співвідношення за записами землетрусу і шуму (UxUze, UxUzn)

Fig. 6. Synthetic spectral ratios $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model TRSU and horizontal phase velocities of 5, 11 and 31 km/s (UxUz5, UxUz11, UxUz31), and experimental ratios calculated using the records of earthquake and noise (UxUze, UxUzn)

Найбільшу залежність частот інтерференційних резонансних максимумів S- і P-хвиль від горизонтальної фазової швидкості (кута падіння плоскої хвилі з глибини нижнього півпростору) виявлено у теоретичному спектральному співвідношенні $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$, обчисленому за допомогою матричного методу для моделі UZH, особливості якої полягала у наявності істотних інверсій розподілу швидкості поширення поздовжніх хвиль з глибиною (рис. 9).

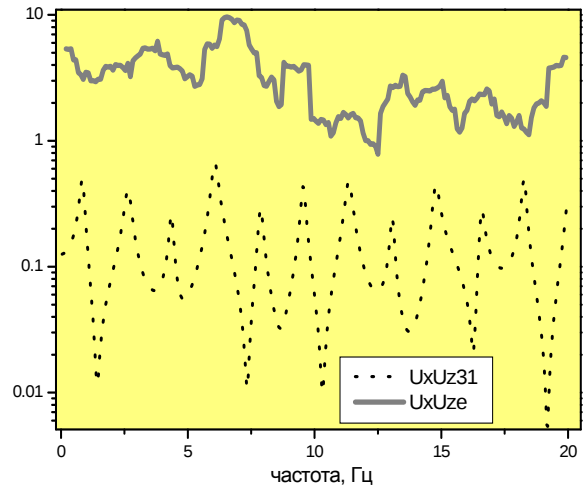


Рис. 7. Теоретичне спектральне співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$

для моделі TRSU за горизонтальної фазової швидкості 31 км/с (UxUz31) й експериментальне співвідношення за записами землетрусу (UxUze)

Fig. 7. Synthetic spectral ratio $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model TRSU and horizontal phase velocity of 31 km/s (UxUz31), and experimental ratio calculated using the records of earthquake (UxUze)

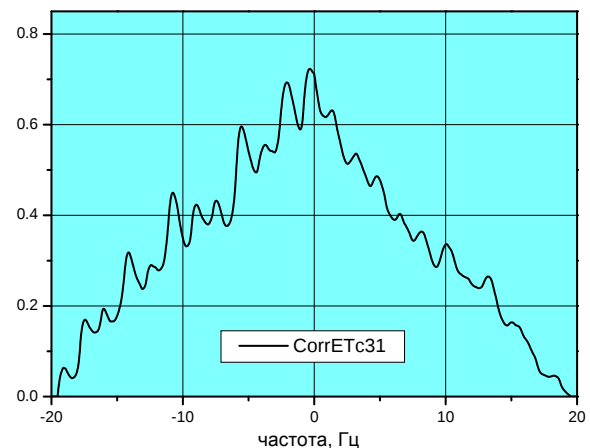


Рис. 8. Функція взаємної кореляції між теоретичним спектральним співвідношенням $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі TRSU за фазової швидкості 31 км/с й експериментальним співвідношенням за записами землетрусу

Fig. 8. Cross-correlation function between synthetic spectral ratio $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model TRSU at phase velocity 31 km/s, and experimental ratio calculated from the records of earthquake

Інверсії швидкості у діапазоні глибин від 40 до 150 м і на глибинах більших за 250 м (у нижньому півпросторі моделі) пов'язані з перешаруваннями порід осадового і вулканічного походження [Гнип, 2015], що, радше, є результатом впливу вулканічних процесів, поширених у цій частині Закарпатського прогину у геологічному минулому.

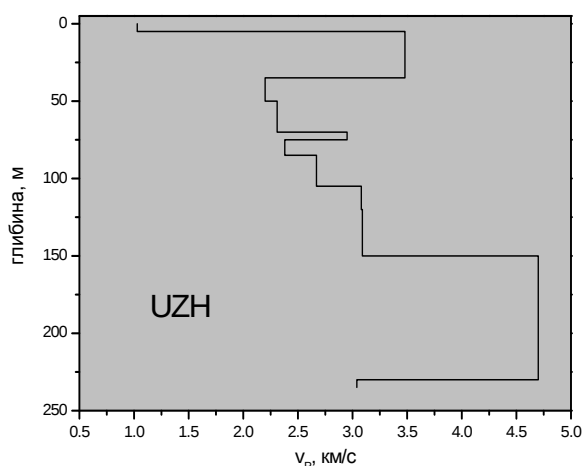


Рис. 9. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією Ужгород (UZH)
Fig. 9. Velocity model under the station Uzhgorod (UZH)

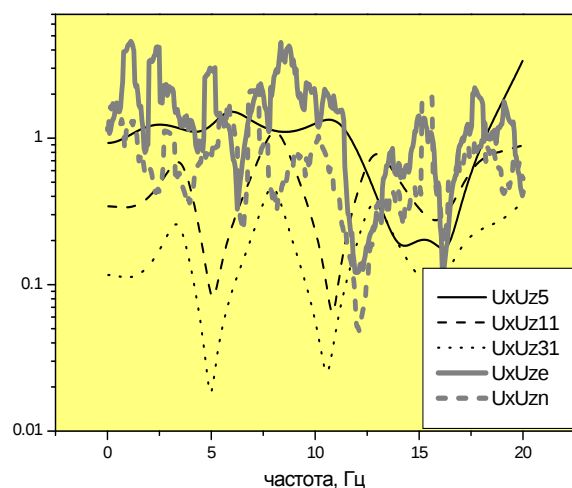


Рис. 10. Теоретичні спектральні співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі UZH за горизонтальної фазової швидкості 5, 11 і 31 км/с (UxUz5, UxUz11, UxUz31) й експериментальні співвідношення за записами землетрусу і шуму (UxUze, UxUzn)
Fig. 10. Synthetic spectral ratios $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model UZH at horizontal phase velocities of 5, 11 and 31 km/s (UxUz5, UxUz11, UxUz31), and experimental ratios calculated using the records of earthquake and noise (UxUze, UxUzn)

Найтонший поверхневий шар глин (до 5 м) зумовлює резонансні максимуми на дуже високих частотах (28,7 Гц – для S-хвиль і 50,8 Гц – для P) далеко за межами робочого діапазону приладів [Гнип, 2015] і не впливає вочевидь на результати спостережень на станції (рис. 1).

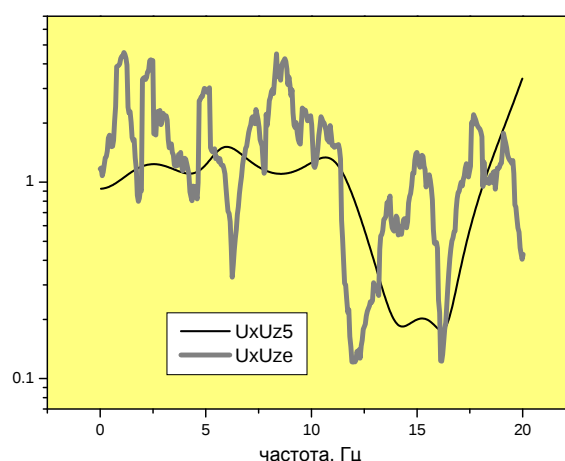


Рис. 11. Теоретичне спектральне співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі UZH за горизонтальної фазової швидкості 5 км/с (UxUz5) й експериментальне співвідношення для землетрусу (UxUze)
Fig. 11. Synthetic spectral ratio $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model UZH at horizontal phase velocity of 5 km/s (UxUz5), and experimental ratio calculated using the records of earthquake (UxUze)

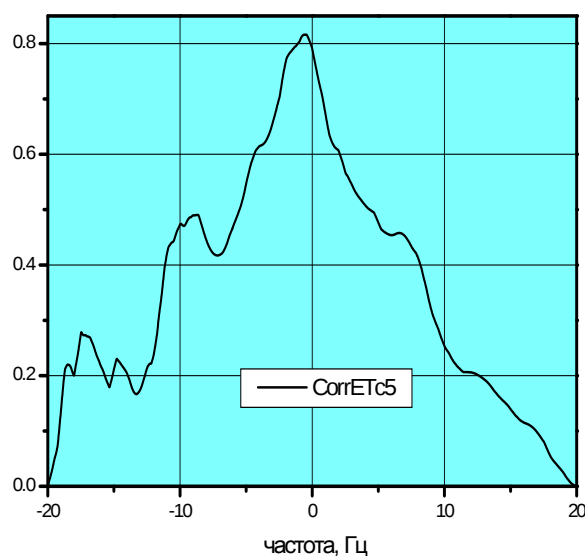


Рис. 12. Функція взаємної кореляції (лінійна) між теоретичним спектральним співвідношенням $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі UZH за фазової швидкості 5 км/с й експериментальним співвідношенням за записами землетрусу
Fig. 12. Cross-correlation function (linear) between synthetic spectral ratio $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model UZH at phase velocity 5 km/s, and experimental ratio calculated from the records of earthquake

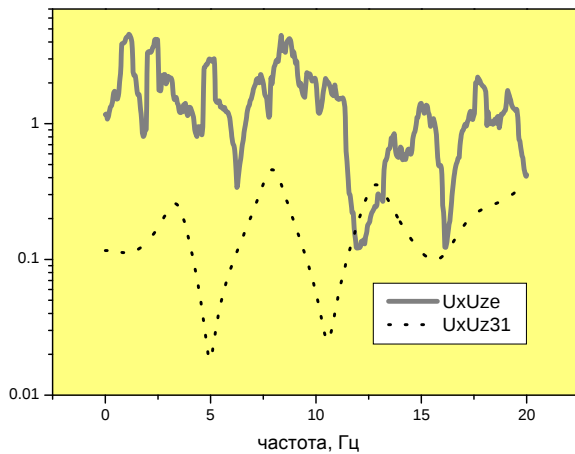


Рис. 13. Теоретичне спектральне співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі UZH за горизонтальної фазової швидкості 31 км/с (UxUz31) й експериментальне співвідношення за записами землетрусу (UxUze)

Fig. 13. Synthetic spectral ratio $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model UZH at horizontal phase velocity of 31 km/s (UxUz31), and experimental ratio calculated using the records of earthquake (UxUze)

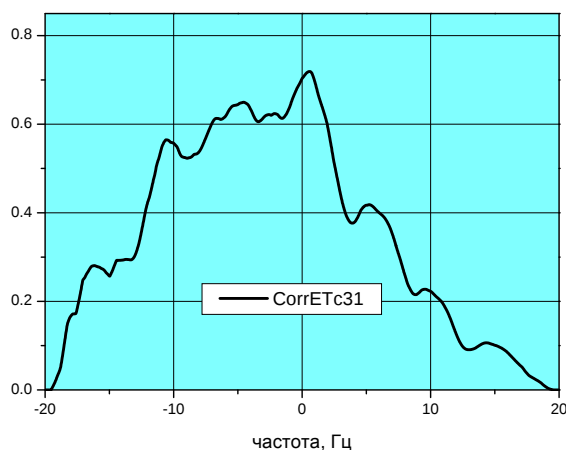


Рис. 14. Функція взаємної кореляції (лінійна) між теоретичним спектральним співвідношенням $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для моделі UZH за фазової швидкості 31 км/с й експериментальним співвідношенням за записами землетрусу

Fig. 14. Cross-correlation function (linear) between synthetic spectral ratio $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ for the model UZH at phase velocity 31 km/s, and experimental ratio calculated from the records of earthquake

Закономірно, що як і на станції Міжгір'я найвищу кореляцію (більше ніж 0,8 і з мінімальним зсувом по частоті) на станції Ужгород у межах досліджуваного частотного діапазону виявлено між теоретичним співвідношенням $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ за горизонтальної фазової швидкості 5 км/с й експериментальним співвідношенням для землетрусу з близькою

за значенням (5,5 км/с) швидкістю вступу поздовжньої хвилі на станції (рис. 10, 11, 12). На рис. 13 наведено експериментальне співвідношення для землетрусу і теоретичне за фазової швидкості 31 км/с, ступінь кореляції між якими виявився менший (рис. 14), ніж між експериментальним співвідношенням і теоретичним за швидкості 5 км/с (рис. 12), що не просто утім виявити суто візуально, без застосування кількісних оцінок, таких як функція взаємної кореляції. Важливо також зазначити, що частоти резонансних максимумів у співвідношенні, обчисленому за записами шумів на станції Ужгород, практично збігаються з частотами співвідношення для землетрусу.

Наукова новизна

Уперше інтерференційні резонансні властивості приповерхневих шарів середовища під сейсмічними станціями Міжгір'я, Тросник і Ужгород оцінено з використанням двох альтернативних підходів – теоретичного обчислення спектрального співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні за моделями, побудованими за даними буріння, та експериментального визначення співвідношення за компонентами записів малих землетрусів і шумів на цих станціях. Доведено збіжність результатів цих підходів та доцільність їхнього використання в сейсмологічних дослідженнях у Карпатському регіоні.

Практична значущість

Частоти інтерференційних резонансів у шаруватому середовищі під сейсмічними станціями необхідно враховувати під час оцінювання впливу середовища на записи сейсмічних сигналів на станціях, оцінювання параметрів можливого сейсмічного впливу тощо. Запропоновано надійні й ефективні методи оцінювання цих частот і товщин поверхневих шарів теоретичним моделюванням частотних характеристик середовища і їхнього експериментального визначення за записами землетрусів і шумів на станціях.

Висновки

У роботі можна виокремити два головні аспекти – теоретично-методичний і суто практичний, результативний. У першому завдання полягало у з'ясуванні ступеня збіжності інтерференційних резонансних частот приповерхневих шарів середовища під сейсмічними станціями, визначених обчисленням теоретичного спектрального співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на поверхні ідеально-пружного горизонтально-шаруватого середовища, збуджених плоскою поздовжньою хвилею (частотних характеристик), за допомогою алгоритму [Starodub, Gnyp, 1999], розробленого на основі

матричного методу [Вербицкий и др., 1985], за моделями, побудованими з використанням даних неглибокого буріння поблизу станцій [Гнип, 2015], й експериментально, за допомогою прямого обчислення спектральних співвідношень між компонентами записів малих землетрусів і шумів. Ступінь збіжності визначених обома способами частот визначав натомість ступінь їхньої достовірності, а тим самим і придатності до подальшого використання у різних завданнях сейсмологічних досліджень, що становило предмет другого, практичного, аспекту роботи. Як заздалегідь і належало сподіватися, амплітудні спектри як теоретичних, так й експериментальних частотних характеристик середовища під трьома сейсмічними станціями Закарпаття виявилися складнішими (за винятком можливо станції Тросник, де резонансні частоти визначалися по суті єдиним порівняно товстим поверхневим шаром піщано-галькової суміші, що сформувався в алювіальній долині р. Тиса). З огляду на це – і попри те, що виразні максимуми і мінімуми усе ж добре помітні на кривих теоретичних й експериментальних спектрів – ступінь збіжності між ними оцінювався кількісно, з використанням функції взаємної кореляції. Найкраще корелювали між собою ($\sim 0,8$ і з мінімальним зсувом по частоті) експериментальні спектри для місцевих землетрусів і теоретичні, обчислені для горизонтальної фазової швидкості плоскої хвилі, близькою до швидкості першого вступу від землетрусів на станціях. Утім, виявлено і високі ступені кореляції між експериментальними спектрами співвідношень для землетрусів і шумів, навіть візуально дуже схожих між собою. Це – знову ж таки у методичному аспекті – може слугувати обґрунтуванням для використання надалі саме спектрів шумів (як у методі Накамури [Nakamura, 1989]) для визначення резонансних частот і товщини поверхневого шару (але лише у разі, коли точно відомо, що він там є, коли відома швидкість поширення хвиль у ньому, і коли відомо, що глибше уже немає дуже контрастних сейсмічних границь [Nishitsuji *et al.*, 2014]). Дуже близька до саме такої трапилася ситуація щодо станції Тросник, де теоретичні фундаментальні резонансні частоти f_0 становили $0,8$ (для S-хвиль) і $1,41$ Гц (для P-) і періодично повторювалися з кратностями 3, 5, 7,... (в S-хвилі) і 2, 4, 8,... (в P-) (як і належало б за [Tsai, 1970] і [Ibs-von Seht, Wohlenberg, 1999]). На експериментальному спектрі з огляду на різні причини резонансних піків в околі частот $0,8$ і $1,41$ Гц не видно (рис. 6), натомість чітко помітні кратні їм частоти, за якими, зрештою, можна визначити і товщину поверхневого шару, який у разі, якщо швидкість v_p у ньому і справді становить $0,71$ км/с (як у нашій моделі), мав би бути дещо тонший з огляду на дуже невелике зміщення резонансів в експериментальному співвідношенні у бік вищих частот (рис. 6, 8), адже за [Tsai, 1970] і [Ibs-von Seht, Wohlenberg, 1999] $f_0^{P,S} = v_{p,s}/4h$, де $v_{p,s}$ – швидкість позовжних або поперечних хвиль у шарі товщиною h .

Ймовірніше, однак, що підвищення частот резонансних максимумів зумовлене вищою за $0,71$ км/с швидкістю v_p . Квазіперіодичність теоретичного й експериментального спектрів для станції Тросник дуже виразно утім видно і на графіку функції взаємної кореляції між ними (рис. 8). Як уже щойно зазначено придатність методу Накамури обмежена доволі суворими умовами. У разі складного багатшаруватого середовища (як у нас під станцією Ужгород) цей метод практично непридатний. За допомогою матричного методу (у прямій постановці) можна оцінити резонансні частоти для такої моделі, якщо її параметри заздалегідь відомі (як у нас, за результатами буріння). Для визначення ж параметрів шарів – адже буріння дороге і не всюди може бути проведене – матричний метод буде придатний лише у разі розв'язування на його основі оберненої задачі, коли параметри шарів визначаються за записами переміщень на поверхні, що може, зрештою, становити окремий предмет досліджень (див. утім [Starodub, Gnyr, 1999], де методику розв'язування оберненої задачі – хоч і в дещо іншій постановці – вже було розроблено).

Очевидним недоліком у роботі було те, що експериментальні співвідношення визначалися лише за одним записом землетрусу або шуму (на відміну, наприклад, від [Nishitsuji *et al.*, 2014]). Оскільки вони характеризують середовище і залежать (принаймні мали б) лише від його параметрів співвідношення мали б бути однакові для багатьох джерел і – таким чином – підлягали б усередненню в спектральній ділянці за великою кількістю записів з метою усунення випадкових завад. Серед останніх можна назвати горизонтальні варіації швидкостей (або інші – але невеликі – відхилення від горизонтальної шаруватості середовища під станціями), “забруднення” записів коливаннями від джерел, щодо яких інваріантність спектрального співвідношення не чинна, наявність в експериментальних записах фаз, не врахованих у моделі, неточне задання параметрів моделі (адже якщо сумнівів щодо глибин границь між шарами порід за даними буріння і не виникає, то швидкості поширення хвиль у породах того самого типу можуть варіювати у доволі широких межах) тощо. З удосконаленням процедури масової обробки записів сейсмічними станціями Карпатської мережі можна сподіватися на отримання надійніших оцінок частотних характеристик середовища як під станціями, для яких вони уже визначалися у цій роботі, так й усіх інших, для яких це завдання однаково залишається на порядку денному.

Література

- Аранович З. И., Токмаков В. А., Трапезников Н. Л. Широкополосные среднепериодные велосиметры на базе сейсмометра СМЗ-КВ с обратной связью // Сейсмические инструменты. – 1996. – № 25/26. – С. 111–118.

- Вербицкий Т. З., Починайко Р. С., Стародуб Ю. П., Федоришин А. С. Математическое моделирование в сейсморазведке. – К.: Наук. думка, 1985. – 275 с.
- Гнип А. Теоретичні й експериментальні спектри H/V для середовища під сейсмічною станцією “Міжгір’я” // Матеріали наукової конференції “Сейсмологічні дослідження в сейсмоактивних регіонах”, 29–30 травня 2012 р. – Львів, 2012. – С. 37–40.
- Гнип А. Р. Теоретичні частотні характеристики приповерхневих шарів під сейсмічними станціями “Ужгород”, “Тросник” і “Міжгір’я” // Геодинаміка. – 2015. – № 19(2). – С. 72–84. (поточне видання)
- Сейсмологічний бюллетень України за 2006 год. / Ред. Б. Г. Пустовитенко. – Інститут геофізики ім. С. І. Субботина НАН України. – Симферополь, 2008. – 295 с.
- Bensen G. D., Ritzwoller M. H., Barmin M. P., Levshin A. L., Lin F., Moschetti M. P., Shapiro N. M. and Yang Y. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophysical Journal International*. – 2007. – Vol. 169. – P. 1239–1260. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Ibs-von Seht M., and Wohlenberg J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1999. – Vol. 89, No. 1. – P. 250–259.
- Nishitsuji Y., Ruigrok E., Gomez M., and Draganov D. Global-Phase H/V Spectral Ratio for Delineating the Basin in the Malargüe Region, Argentina // *Seismological Research Letters*. – 2014. – Vol. 85, No. 5. – P. 1004–1011, doi: 10.1785/0220140054, 1004-1011.
- Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. – 1989. – Vol. 30, No. 1. – P. 25–33.
- Starodub G., Gnyp A. Models of the Earth’s Crust Structure in the East Carpathian Region determined from Inversion of Farfield P-waveforms // *Acta Geophysica Polonica*. – 1999. – Vol. 47, No. 4. – P. 375–400.
- Tsai N. C. A note on the steady-state response of an elastic half-space // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1970. – Vol. 60, No. 3. – P. 795–808.

А. Р. ГНІП

Карпатское отделение Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 79060, г. Львов, ул. Научная, 3-б, тел. +38(032)2648563, эл. почта gnyp@cb-igph.lviv.ua

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПОД СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ “ТРОСНИК”, “УЖГОРОД” И “МЕЖГОРЬЕ”

Цель. В работе экспериментальные спектральные соотношения между горизонтальной и вертикальной составляющими смещений в колебаниях, возбужденных местными землетрясениями и шумами, зарегистрированных сейсмическими станциями Ужгород, Тросник и Межгорье (частотные характеристики среды под станциями), сравниваются с рассчитанными теоретически с использованием скоростных моделей, построенных по данным бурения в приповерхностных слоях; оценивается степень совпадения резонансных частот и перспектива использования экспериментальных и теоретических частотных характеристик в региональных сейсмологических исследованиях. **Методика.** Теоретические спектральные соотношения между горизонтальной и вертикальной составляющими смещений на свободной поверхности идеально-упругого горизонтально-слоистого полупространства для источника в виде продольной плоской волны рассчитывались с использованием алгоритма, построенного на основе матричного метода, и сравнивались с экспериментальными, рассчитанными с использованием отрезков записей малых землетрясений и шумов, исправленных за влияние сейсмографа, длину которых выбирали такой, чтобы обеспечить отсев глубинных фаз, возможно не учтенных при расчете теоретических соотношений вследствие недостаточной общей толщины моделей, а также фаз, образованных падением прямых поперечных волн от источника. Степень совпадения между частотными характеристиками оценивалась путем вычисления функции взаимной корреляции между ними. **Результаты.** Самые высокие степени взаимной корреляции получены между экспериментальными частотными характеристиками среды под сейсмическими станциями Карпатской сети, определенных с использованием записей местных землетрясений, и теоретическими характеристиками для горизонтальных фазовых скоростей, которые соответствуют скоростям вступлений продольных волн на станциях от землетрясений. О неслучайном характере совпадения можно судить по высоким значениям максимумов функции, которые достигали ~ 0,8 и более, и с учетом незначительных значений смещений по частоте, ~ 0,2 Гц и менее. Это может свидетельствовать, с одной стороны, как об адекватности моделей, построенных по данным бурения и использованных для расчета теоретических частотных характеристик, так и о применимости экспериментального соотношения для оценивания резонансных частот среды под станциями, где данные бурения отсутствуют, с другой. Получены также и высокие степени корреляции между экспериментальными спектральными соотношениями между составляющими записей малых

землетрясений и соотношениями для шумов, что позволяет использовать только шумы для оценивания резонансных свойств среды. **Научная новизна.** Впервые интерференционные резонансные свойства слоев среды под сейсмическими станциями Межгорье, Тросник и Ужгород оценены с использованием двух альтернативных подходов – расчета теоретического спектрального соотношения между горизонтальной и вертикальной составляющими смещений на свободной поверхности с использованием моделей, построенных по данным бурения, и определения экспериментального соотношения с использованием записей малых землетрясений и шумов на этих станциях. Доказана сходимость результатов этих подходов и целесообразность их использования в сейсмологических исследованиях в Карпатском регионе. **Практическая значимость.** Частоты интерференционных резонансов в слоистой среде под сейсмическими станциями необходимо учитывать при оценивании влияния среды на записи сейсмических сигналов на станциях, параметров возможного сейсмического воздействия и т.п. Предложены надежные и эффективные методы оценивания этих частот и мощности поверхностных слоев путем теоретического моделирования частотных характеристик среды и их экспериментального определения с использованием записей землетрясений и шумов на станциях.

Ключевые слова: слоистая среда, частотная характеристика, метод Накамуры, матричный метод, резонансные частоты, интерференция.

R. GNYP

Carpathian Branch of Subbotin Name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 3-b, Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine, tel. +38(032)2648563, e-mail gnyp@cb-igph.lviv.ua

SYNTHETIC AND EXPERIMENTAL FREQUENCY CHARACTERISTICS OF NEAR-SURFACE LAYERS UNDER THE SEISMIC STATIONS TROSNYK, UZHGOROD, AND MIZHGIRYA

Purpose. In the paper, experimental spectral ratios between horizontal and vertical components of displacements from local earthquakes and noise recorded at the stations Uzhgorod, Trosnyk and Mizhgirya (frequency characteristics of the medium under the stations) are compared to synthetic ratios calculated using the velocity models built based on the data of drilling in near-surface layers; correlation between the resonance frequencies is evaluated, as well as the applicability of experimental and synthetic frequency characteristics in the regional seismological investigations. **Methodology.** The synthetic spectral ratios between horizontal and vertical components of displacements on the free surface of perfectly elastic horizontally-layered half-space were calculated using the algorithm designed based on matrix method and plane *P*-wave as a source and compared subsequently to the experimental ones obtained, after the deconvolution of seismograph response, from the portions of records of small earthquakes and noise as short as to eliminate the deep phases, possibly not accounted for in the synthetic ratios owing to insufficient total thickness of the models, and phases arising after the arrival of direct *S*-wave from the earthquake. Similarity between the synthetic and experimental frequency characteristics was evaluated by calculating a function of cross-correlation between them. **Results.** The highest rates of cross-correlation were obtained between experimental frequency characteristics of the medium under the stations of Carpathian network estimated from the records of local earthquakes and synthetic characteristics calculated at horizontal phase velocities corresponding to velocities of first arrivals of *P*-waves from the earthquakes at the stations. That the correlation was not of incidental character might be concluded both from high values of corresponding maxima, achieving ~0.8, and more, and from insignificant values of their frequency shift, ~0.2 Hz, and less. The high rates of correlation might be considered as an adequacy test for the velocity models, built based on the data of drilling and used subsequently in calculation of synthetic frequency characteristics, on the one hand, and as a test on reliability of resonance frequencies estimated from the experimental ratios in the locations where data of drilling would not be available, on the other. The high rates of cross-correlation also obtained between experimental spectral ratios for small earthquakes recorded at the stations and the ratios for noise seemed to justify only the using of noise for estimation of resonance properties of near-surface medium. **Originality.** For the first time, resonance properties of near-surface layers under the seismic stations Mizhgirya, Trosnyk and Uzhgorod have been estimated based on two alternative approaches – by calculating the synthetic spectral ratios between horizontal and vertical components of displacements on the free surface using velocity models built based on the data of drilling, and by calculating the experimental ratios between the components of records of small earthquakes and noise at the stations. It has been confirmed that the results of both the approaches converge well, which justifies their eventual application in seismological investigations in the Carpathian region. **Practical significance.** The frequencies of interferential resonances in a layered medium under the seismic stations should be accounted for during the analysis of seismic signals recorded at the stations, in estimation of parameters of seismic load etc. Reliable and effective methods have been suggested for estimation of the frequencies and of the thicknesses of near-surface layers by theoretical modeling of frequency characteristics of the medium, and experimentally, from the records of earthquakes and noise at the stations.

Key words: layered medium, frequency characteristic, Nakamura's technique, matrix method, resonance frequency, interference.

REFERENCES

- Aranovich Z. I., Tokmakov V. A., Trapeznikov N. L. *Shyrokopolosniye sredneperiodniye velosimetry na baze seismometra CM3-KV s obratnoi svyazyu* [Broadband midrange velocimeters based on seismometer CM3-KB with feedback], *Seysmicheskiye instrumenty* [Seismic instruments], 1996, No. 25/26, pp. 111–118.
- Verbytskyi T. Z., Pochynaiko R. S., Starodub Yu. P., Fedoryshyn A. S. *Matematicheskoye modelirovaniye v seismorazvedke* [Mathematical modeling in seismic exploration], Kyiv, Naukova dumka, 1985, 275 p.
- Gnyp A. *Teoretychni i eksperymentalni spektry H/V dlya seredovyshcha pid seismichnoyu stantsiyeyu "Mizhgirya"* [Theoretical and experimental spectra H/V for the medium under seismic station Mizhgirya], *Materialy naukovoyi konferentsiyi "Seismolohichni doslidzhennya v seismoaktyvnykh rehionakh"* [Proceedings of conference "Seismological investigations in seismically active regions"], Lviv, 2012, pp. 37–40.
- Gnyp A. *Teoretychni chastotni kharakterystyky prypoverkhnevnykh shariv pid seismichnymy stantsiyamy Uzhgorod, Trosnyk i Mizhgirya* [Synthetic frequency characteristics of near-surface layers under the seismic stations Uzhgorod, Trosnyk and Mizhgirya], *Geodynamics*, 2015, No. 19(2), pp. 72–84 (the current issue)
- Seismologicheskyy buleten Ukrainy za 2006 god* [Seismological bulletin of Ukraine for 2006] / Ed. Pustovitenko B. G., *Institut geofiziki im.S.I.Subbotina NAN Ukrainy* [Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine], Simferopol, 2008, 295 p.
- Bensen G. D., Ritzwoller M. H., Barmin M. P., Levshin A. L., Lin F., Moschetti M. P., Shapiro N. M., and Yang Y. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*. 2007, Vol. 169, pp. 1239–1260. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Ibs-von Seht M., and Wohlenberg J. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1999, Vol. 89, No. 1, pp. 250–259.
- Nishitsuji Y., Ruigrok E., Gomez M., and Draganov D. Global-Phase H/V Spectral Ratio for Delineating the Basin in the Malargüe Region, Argentina // *Seismological Research Letters*. 2014, Vol. 85, No. 5, pp. 1004–1011, doi: 10.1785/0220140054, 1004–1011.
- Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. 1989, Vol. 30, No. 1, pp. 25–33.
- Starodub G., Gnyp A. Models of the Earth's Crust Structure in the East Carpathian Region determined from Inversion of Farfield P-waveforms. *Acta Geophysica Polonica*. 1999, Vol. 47, No. 4, pp. 375–400.
- Tsai N. C. A note on the steady-state response of an elastic half-space // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1970, Vol. 60, No. 3, pp. 795–808.

Надійшла 02.04.2016 р.