

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 gnyp@cb-igph.lviv.ua

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

Мета. З метою отримання кількісних оцінок динамічних параметрів впливу особливостей швидкісного розрізу середовища під сейсмічними станціями для трьох станцій Карпатської мережі за моделями, побудованими за даними буріння у приповерхневих шарах, за допомогою алгоритму, розробленого на основі матричного методу, обчислено спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні (частотні характеристики), які залежать лише від властивостей середовища і характеризують його резонансні властивості. **Методика.** У методичному аспекті перевірено ступінь збігу інтерференційних резонансних частот в ідеально пружному шаруватому середовищі, обчислених за допомогою розробленого алгоритму для джерела у вигляді плоскої хвилі і прогнозованих за методом Накамури, а в наступній роботі буде оцінено ступінь їхнього збігу з частотами експериментальних характеристик, обчислених з використанням реальних записів шумів і землетрусів, перспективу використання цих методів у регіональних сейсмологічних дослідженнях. **Результати.** Головні резонансні максимуми у спектральних співвідношеннях між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень, обчислених для станцій Ужгород і Міжгір’я, належать найтоншим (не більше ніж десять метрів) поверхневим шарам переважно глинистих відкладів і перебувають у високочастотних ділянках спектра практично поза межами робочого діапазону приладів, справляючи так мінімальний вплив на результати спостережень на станціях. Однак, на відміну від методу Накамури, у якому можна оцінити товщину/резонансний максимум лише одного (зазвичай поверхневого) шару, спектральні співвідношення, обчислені за допомогою матричного методу, дали змогу виявити й інші максимуми, зумовлені складнішою будовою середовища, зокрема такою, як під станцією Ужгород, які натомість перебувають вже у межах робочого діапазону приладів і які необхідно враховувати. Незважаючи на те, що моделі середовища під іншими двома станціями (Тросник і Міжгір’я) були дещо простіші, виразні резонансні максимуми у робочих ділянках спектра були виявлені і тут. **Наукова новизна.** Уперше за швидкісними моделями перших сотень метрів шаруватого середовища під трьома сейсмічними станціями Карпатської мережі, побудованими за даними буріння, обчислено з використанням матричного методу частотні характеристики, які залежать лише від властивостей середовища і характеризують його резонансні властивості. **Практична значущість.** Обчислені частотні характеристики дають змогу оцінити ступінь впливу середовища на записи сейсмічних сигналів на станціях, що найістотніше на частотах, які відповідають отриманим інтерференційним резонансним максимумам (і мінімумам). Ці частоти необхідно враховувати під час аналізу та інтерпретації записів сейсмічних сигналів, під час оцінювання параметрів можливого сейсмічного впливу тощо.

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

Вступ

Пружні коливання від землетрусів, що відбуваються зазвичай лише в консолідованих масивах земної кори – із запасом міцності, достатнім для нагромадження в них енергії пружних деформацій, вивільнення якої відбувається в разі перевищення порогу міцності та руйнування масивів порід під час землетрусу – реєструються сейсмографами, розташованими найчастіше – цілком зрозуміло – на поверхні неконсолідованих осадів, і зазнають на своєму шляху дуже істотного впливу останніх, зокрема, дуже контрастної сейсмічної границі між цими двома шарами. Первинна інформація у коливаннях, зокрема, про вогнище землетрусу, хоч і не втрачається повністю, то усе ж істотно спотворюється через розсіювання, поглинання, інтерференцію і конверсію типів

хвиль у неконсолідованих осадових товщах. Врахування цього впливу є необхідною умовою під час виконання багатьох завдань сейсмологічних досліджень – від тих, що стосуються вивчення самого джерела землетрусу (зокрема, визначення його спектральних характеристик), до оцінювання параметрів можливого сейсмічного впливу у певній місцевості. З огляду на це, під час розгортання сейсмологічних мереж (особливо довготривалих) уже давно усталася практика проведення спеціальних систематичних досліджень з вивчення особливостей умов спостережень на кожній зі станцій з урахуванням відхилення швидкостей поширення різних типів хвиль у приповерхневих шарах від стандартних регіональних моделей. Основною метою у такому разі зазвичай є визначення реалістичних одновимірних моделей сейсмологічного розрізу, а також оцінювання

впливу можливих дво- або тривимірних неоднорідностей в околі станції [Michel *et al.*, 2014].

На мережі сейсмічних станцій Карпатського регіону України (рис. 1), що неперервно функціонує уже протягом багатьох десятиліть, ведеться постійна робота з розширення та удосконалення (збільшення кількості пунктів спостережень, запровадження цифрової реєстрації, оперативної передачі та автоматизації обробки даних спостережень, створення цифрової бази даних сейсмологічної інформації, налагодження регулярного контролю за динамічними характеристиками апаратури і т. ін.) [Вербицький С. Т., Вербицький Ю. Т., 2005]. Елементом комплексного підходу до вивчення місцевих умов на станціях мережі можна вважати визначення у роботах [Gnyр, 2009, 2010; Назаревич, Назаревич, 2004а, 2004б] т.зв. кінематичних станційних поправок з метою урахування зумовленого варіаціями швидкостей поширення хвиль безпосередньо в околі кожної зі станцій відхилення часу пробігу хвиль від вогнищ місцевих землетрусів до станції від карпатського годографа [Кутас, и др., 1999, 2003], який зазвичай використовується як регіональна швидкісна модель земної кори (зокрема, під час локалізації місцевих землетрусів). У роботі [Козловський та ін., 2013] запропоновано уточнення до регіональної шаруватої моделі середовища у вигляді т.зв. азимутальних коефіцієнтів. Для окремих сейсмічних станцій (Ужгород, Косів, Міжгір'я) через розв'язування оберненої задачі за даними записів

поздовжних хвиль від телесеїсмічних вогнищ визначалися індивідуальні одновимірні швидкісні моделі земної кори [Starodub, Gnyр, 1999]. У цих товстошарових моделях був слабо, однак, відображений вплив саме приповерхневих, тонших шарів з найбільшими варіаціями швидкості.

З метою докладнішого вивчення мінералогічного складу порід і товщини відповідних шарів до глибини перших кількох сотень метрів у минулі роки поблизу деяких зі станцій мережі (Тросник, Міжгір'я, Ужгород, Косів та ін.) пробурено спеціальні розвідувальні свердловини. Якщо відома швидкість поширення хвиль у контрастному поверхневому осадовому шарі (наприклад за результатами неглибокого буріння), можна визначити його товщину, використовуючи метод Накамури, який ґрунтується на визначенні резонансних частот у співвідношенні спектрів горизонтальної та вертикальної складової записів на поверхні цього шару шумів, або землетрусів [Nakamura, 1989]. Зокрема, у роботі [Nishitsuji *et al.*, 2014] метод використано для визначення змінної глибини дна товстошарового басейну осадових порід на пн.-зх. Аргентини за записами фаз *P*- і *S*-хвиль від телесеїсмічних землетрусів станціями місцевої мережі. Метод Накамури – хоч досі й повністю теоретично не обґрунтований – набув великого поширення у сейсмологічних дослідженнях (див. багатий перелік прикладів у посиланнях до [Nishitsuji *et al.*, 2014]) завдяки надійності і простоті застосування.

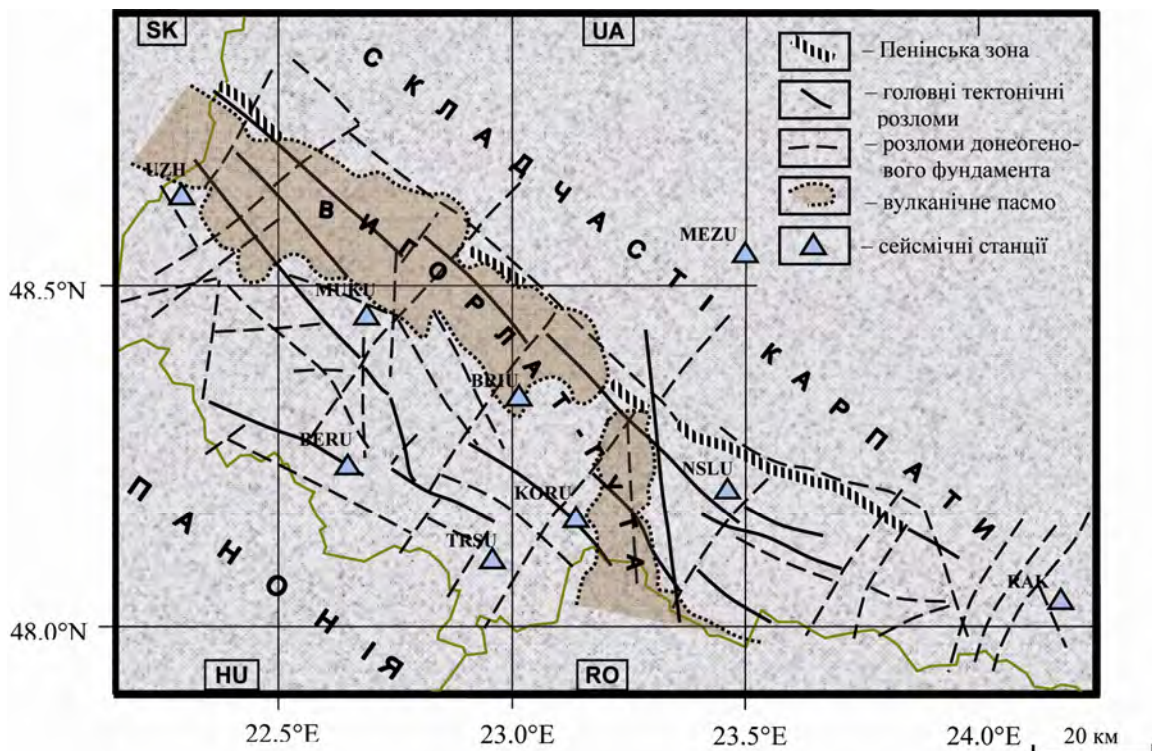


Рис. 1. Розташування сейсмічних станцій Карпатської мережі й основні елементи місцевої тектоніки за [Хоменко, 1971, 1987]

Fig. 1. Location of the Carpathian seismic network stations and main elements of the local tectonics according to [Khomenko, 1971, 1987]

Відомо, утім, що співвідношення спектрів горизонтальної та вертикальної складових переміщень на вільній поверхні (або т.зв. реакція або передавальна функція середовища у часовій ділянці) має чіткий фізичний зміст – як у спектральній ділянці, такі і в часовій – у разі, коли середовище горизонтально-шарувате, а джерелом коливань є плоска хвиля (поздовжна або поперечна), що поширюється з глибини нижнього півпростору. Для певного хвильового числа (що відповідає куту падіння плоскої хвилі) ця функція залежить лише від параметрів середовища (товщини шарів, їхньої густини, швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у них) [Starodub, Gnyр, 1999], а максимуми її спектра відповідають частотам, на яких відбувається інтерференційне підсилення горизонтальних коливань відносно вертикальних і на яких можуть у разі їхнього збігу з частотами власних коливань споруди або її частин виникати небезпечні явища резонансного підсилення і руйнування.

Мета

З метою отримання кількісних оцінок динамічних параметрів впливу особливостей швидкісного розрізу середовища під сейсмічними станціями пропонується використати т.зв. частотні характеристики, або співвідношення спектрів горизонтальної і вертикальної складової записів на поверхні шумів, або землетрусів, максимуми і мінімуми яких за певних умов не залежать від форми спектра коливань у джерелі і відповідають інтерференційним резонансам *P*- або *S*-хвиль у шарах з контрастними властивостями. З цією метою для трьох сейсмічних станцій Карпатської мережі (Ужгород – UZH, Міжгір'я – MEZU, Тросник – TRSU, рис. 1) за моделями, побудованими за даними буріння, з використанням алгоритму [Starodub, Gnyр, 1999], розробленого на основі матричного методу [Вербицкий и др., 1985], буде обчислено теоретичні частотні характеристики середовища, які можна порівняти з експериментальними і перевірити ступінь збігу оцінок резонансних властивостей цими методами і перспективу їхнього використання в регіональних сейсмологічних дослідженнях.

Методика

За [Tsai, 1970] і [Ibs-von Seht, Wohlenberg, 1999], зокрема, фундаментальна резонансна частота для *P*- або *S*-хвиль, що поширюються у шарі товщиною *h* під невеликим кутом із швидкістю $v_{P,S}$, становить

$$f_0^{P,S} = \frac{v_{P,S}}{4h} \tag{1}$$

Форма спектрів коливань, зареєстрованих на поверхні шаруватого середовища, буде визначатися однак під впливом усіх шарів, як також і розподілу амплітуд у спектрі коливань самого джерела. Утім, за Накамураю [Nakamura, 1989],

співвідношення спектрів горизонтальної та вертикальної складових коливань у шумах, зареєстрованих на поверхні, не містить спектральних характеристик джерела і залежить лише від властивостей середовища (сам Накамура називає їх *квазіпердавальними спектрами – quasi-transfer spectra, QTS*). Тоді, якщо єдиним контрастним шаром у середовищі є поверхневі осади, а швидкості поширення хвиль в інших шарах відрізняються набагато менше, резонансна частота саме поверхневого шару і визначатиме переважно розподіл амплітуд у спектрах коливань, зареєстрованих на поверхні.

За більшої кількості контрастних границь для обчислення резонансних частот необхідно використовувати складніші методи, зокрема, у роботі буде перевірено придатність з цією метою матричного методу динамічної теорії поширення пружних хвиль у шаруватому середовищі [Вербицкий и др., 1985; Starodub, Gnyр, 1999]. У двовимірному випадку, коли середовище моделюється пачкою плоскопаралельних ідеально-пружних шарів із товщинами h_i , швидкостями поширення поздовжніх і поперечних хвиль v_{P_i} і v_{S_i} , і густинами ρ_i (рис. 2), у ділянці частот і хвильових чисел з використанням матричного методу можна отримати співвідношення між вектором хвильових потенціалів у нижньому півпросторі Φ_N і вектором переміщень-напружень на вільній поверхні S_0 :

$$\Phi_N = T_N^{-1} T_{N-1} E_{N-1} T_{N-1}^{-1} T_{N-2}^{-1} T_{N-2} E_{N-2} T_{N-2}^{-1} \dots T_{i+1}^{-1} T_{i+1} E_i T_{i+1}^{-1} T_{i-1}^{-1} \dots T_2^{-1} T_2 E_1 T_1^{-1} S_0, \tag{2}$$

$$= R S_0$$

де $T_i = T(v_{P_i}, v_{S_i}, \rho_i)$ і $E_i = E(h_i, v_{P_i}, v_{S_i})$ – матриці 4×4 , у вирази для елементів яких входять характеристики *i*-го шару;

$\Phi_N = [\varphi_N^+, \psi_N^+, \varphi_N^-, \psi_N^-]^T$, φ_N^+ і φ_N^- – скалярні потенціали для хвиль, що поширюються догори і донизу в шарі *N* (нижній півпростір), ψ_N^+ і ψ_N^- – векторні потенціали;

$S_0 = [u_x^{(0)}, u_z^{(0)}, \sigma_{xz}^{(0)}, \sigma_{zz}^{(0)}]^T$, $u_x^{(0)}$ і $u_z^{(0)}$ – горизонтальна і вертикальна складові переміщень на вільній поверхні, $\sigma_{xz}^{(0)}$ і $\sigma_{zz}^{(0)}$ – компоненти тензора напружень;

$h_i = z_i - z_{i-1}$ [Вербицкий и др., 1985; Starodub, Gnyр, 1999].

Коли джерелом коливань є поздовжна плоска хвиля, що падає на пачку шарів з глибини нижнього півпростору, $\sigma_{xz}^{(0)} = \sigma_{zz}^{(0)} \equiv 0$, $\psi_N^+ \equiv 0$. З виразу (2) тоді можна отримати

$$\begin{bmatrix} \varphi_N^+ \\ 0 \\ \varphi_N^- \\ \psi_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x^{(0)} \\ u_z^{(0)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

і з другого рівняння

$$\frac{u_x^{(0)}}{u_z^{(0)}} = -\frac{r_{22}}{r_{21}} \tag{3}$$

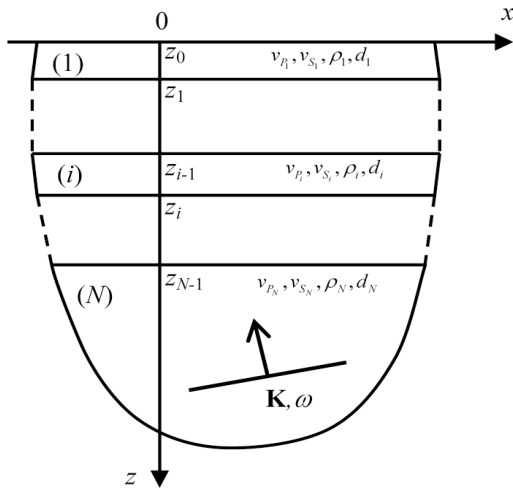


Рис. 2. Модель ідеально-пружного горизонтально-однорідного шаруватого півпростору

Fig. 2. Model of perfectly elastic horizontally-homogeneous layered half-space

Так, спектральне співвідношення між горизонтальною і вертикальною складовою переміщень на вільній поверхні ($u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$) залежить лише від параметрів середовища (r_{22}/r_{21}) і ніяк не залежить від амплітуди і фази коливань у плоскій поздовжній хвилі (φ_N^+), яка є джерелом. Мінімуми і максимуми спектрального співвідношення відповідають інтерференційним резонансам у шаруватому середовищі відповідно поздовжніх і поперечних хвиль й, обчислюючи його у разі відомої моделі середовища, можна перевірити їхню відповідність виразів (1).

З цією метою з використанням розробленого на основі варіанта матричного методу, викладеного в [Вербіцкий и др., 1985], алгоритму і пакета програм [Starodub, Гнур, 1999] обчислено спект-

ральні співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ для однієї з моделей середовища (шар на півпросторі), визначених у [Nishitsuji *et al.*, 2014] за методом Накамури. Товщина осадового шару становила 4,2 км, швидкість поздовжніх хвиль у ньому – 5,2 км/с, у нижньому півпросторі – 7,3 км/с, співвідношення між швидкостями поздовжніх і поперечних хвиль – 1,8, а резонансні частоти, визначені в [Nishitsuji *et al.*, 2014] шляхом статистичного усереднення з використанням записів фаз прямої P- і S-хвиль телесейсмічних подій (плоский фронт), відповідно – 0,31 і 0,17 Гц. На Рис. За наведено співвідношення спектрів горизонтальної і вертикальної компонент $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$, обчислене з використанням алгоритму на основі матричного методу для цієї моделі, коли джерелом коливань є поздовжня плоска хвиля, що падає знизу з горизонтальною фазовою швидкістю 10,9 км/с, що відповідає куту падіння поздовжніх хвиль на вільну поверхню 26,9 град. Такий великий кут падіння обрано з метою увиразнення конвертованих на границі між шаром і півпростором фаз Ps. Густини ρ_i апроксимувалися за швидкостями поздовжніх хвиль з використанням квадратичного співвідношення

$$\rho_i = \alpha_0 + \alpha_1 v_{P_i} + \alpha_2 v_{P_i}^2, \quad (4)$$

коефіцієнти якого α_0 , α_1 і α_2 дібрано за допомогою мінімізації середньо-квадратичного відхилення від спостережуваних залежностей [Азими и др., 1967, 1968; Starodub, Гнур, 1999].

Часова форма співвідношення, наведена на рис. 3, б, теж має чіткий фізичний зміст – її піки відповідають падінню на вільну поверхню фаз Pp, Ps (прямих заломлених і конвертованих на границі між нижнім півпростором і шаром хвиль), PpP_ms і PsP_ms, PsS_ms (фаз Pp і Ps, що зазнали одноразового відбиття від вільної поверхні і від поверхні нижнього півпростору, конверсії та заломлення) і т. д.

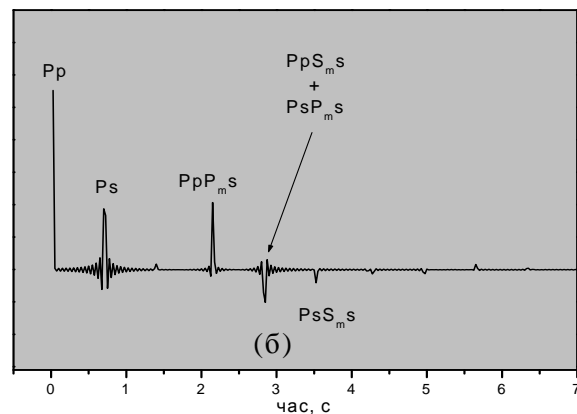
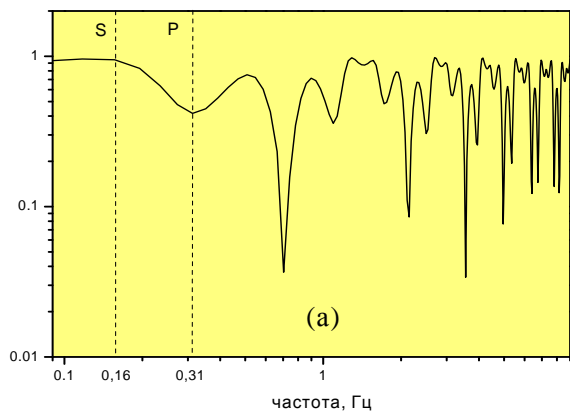


Рис. 3. Обчислене з використанням матричного методу співвідношення між спектрами горизонтальної і вертикальної компонент переміщень на вільній поверхні осадового шару з товщиною, визначеною в [Nishitsuji *et al.*, 2014] за методом Накамури, у частотній (а) і часовій ділянці (б)

Fig. 3. Horizontal to vertical ratio

between spectral components of displacements on a free surface calculated using the matrix method for sedimentary layer with thickness determined in [Nishitsuji *et al.*, 2014] using the Nakamura's technique in frequency (a) and time (b) domain

Фундаментальні резонансні частоти для P - і S -хвиль становлять відповідно 0,31 і 0,16 Гц, що майже точно відповідає частотам глобальних фаз, за якими в роботі [Nishitsuji *et al.*, 2014] за формулою (1) визначено модель середовища. Збіжність результатів дає змогу зробити висновок, що матричний метод у версії [Вербицкий и др., 1985] і створений на його основі алгоритм [Starodub, Gnur, 1999] придатні для обчислення резонансних частот принаймні для товстощарових моделей. Аби перевірити збіжність частот і відповідно придатність алгоритму для моделей з тоншими шарами обчислено спектральні співвідношення $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$, коли товщина шару становила 0,3 і 0,03 км (рис. 4 і 5), швидкість поздовжних хвиль у шарі – 2,2 км/с, у нижньому півпросторі – 5,3 км/с, співвідношення між швидкостями поздовжних і поперечних хвиль – 1,8, а горизонтальна фазова швидкість плоскої поздовжньої

хвилі, що є джерелом коливань і падає знизу майже вертикально – 40,9 км/с. Для першої моделі резонансні частоти за формулою (1) будуть 1,83 (P) і 1,02 Гц (S), для другої – у десять разів більші – відповідно 18,3 і 10,2 Гц. Така сама лінійна залежність резонансних частот у спектрі $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$ від товщини шару має місце й у матричному методі, що виразно видно з рис. 4, а і 4, в, які і тут виявилися дуже близькими до обчислених за формулою (1). Варто теж зазначити, що резонансні частоти вищих порядків демонструють ту саму кратність, про яку йдеться у [Tsaï, 1970] – $3f_0, 5f_0, 7f_0, \dots$ (в S -хвилі) і $2f_0, 4f_0, 8f_0, \dots$ (в P), а амплітуди резонансних піків здебільшого мало відрізняються. За правильно дібраної довжини вікна у часовій ділянці навіть у разі шару товщиною лише 30 м видно дуже виразні фази заломлених, конвертованих і відбитих хвиль (рис. 4, з).

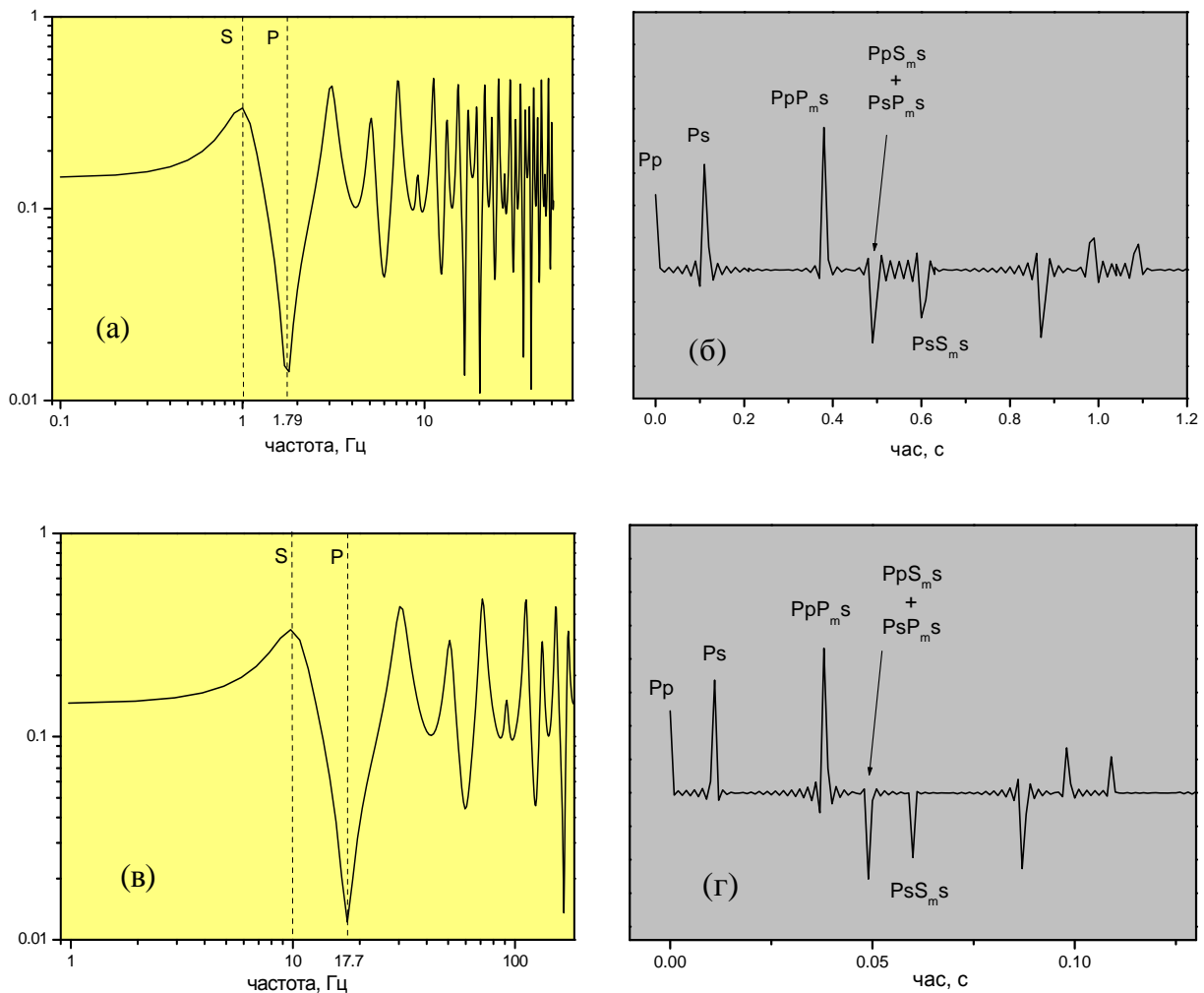


Рис 4. Співвідношення між спектрами горизонтальної і вертикальної компонент переміщень на вільній поверхні шару товщиною 300 м (а, б) і товщиною 30 м (в, г), у частотній і часовій ділянці, обчислені з використанням матричного методу

Fig. 4. Horizontal to vertical ratio between the spectral components of displacements on a free surface of a layer with thickness of 300 m (a, б) and 30 m (в, г) calculated using the matrix method in frequency and time domain

Результати

Обчислення теоретичних частотних характеристик середовища під сейсмічними станціями “Тросник”, “Ужгород” і “Міжгір’я”

У результаті проведеного у попередні роки поблизу деяких сейсмічних станцій Карпатської мережі буріння визначено мінералогічний склад керну й інтервали і глибини залягання відповідного типу порід (робочі матеріали Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України). З використанням літературних даних [Кобранова, 1962; Справочник, 1975] цим інтервалам приписано характерні для цього типу порід швидкості поширення у них поздовжніх хвиль і побудовано так швидкісні моделі шаруватого середовища під сейсмічними станціями “Ужгород”, “Міжгір’я” і “Тросник”, для яких далі з використанням матричного методу обчислювалися частотні характеристики. Співвідношення між швидкостями поздовжніх і поперечених хвиль становило 1,7, а для густини використовувалася квадратична апроксимація (4) за швидкостями поздовжніх хвиль [Азими і др., 1967, 1968; Starodub, Гнур, 1999]. Для усіх трьох станцій частотні характеристики обчислювалися за горизонтальної фазової швидкості 10,9 км/с.

Найпростішу будову середовища виявлено у результаті буріння поблизу сейсмічної станції Тросник. Там, в алювіальній долині р. Тиса, до глибини 120 м залягають галькові відклади з супіщаним заповненням, глибше – до близько 300 м – різні аргіліти, а ще глибше ідуть чергування аргіліту з алевролітом. На контрастній границі між поверхневим шаром і тим, що глибше, швидкість v_p зростає з 0,7 до 2,7 км/с, тоді як на наступній – лише до 3,3 км/с (рис. 5, а). Так можна заздалегідь передбачити, що резонансні частоти визначатимуться переважно поверхневим шаром, як у двошаровій моделі (шар на півпросторі). Резонансні частоти в такому шарі за формулою (1) будуть $f_0=0,87$ (S) і 1,48 Гц (P). З рис. 5, б видно, що це і справді дуже близько до частот спектрального співвідношення горизонтальної і вертикальної компонент переміщень, обчислених з використанням матричного методу для повної тришарової моделі. Часова форма співвідношення (рис. 5, в) теж дуже схожа на ті, що раніше обчислювалися для моделей шар на півпросторі, з виразними піками фаз. Наявна і кратність резонансних частот (з майже однаковими амплітудами), кілька з яких потрапляють у робочий діапазон (приблизно від 0,5 до 7 Гц) сейсмографів СМЗ-КВ [4], встановлених на станції, і які – зрозуміло – істотно впливатимуть на результати спостережень на станції.

Складнішу модель отримано для сейсмостанції Ужгород. І не лише з огляду на більшу кількість шарів, а й на інверсію швидкостей v_p у

ній через те, що майже на поверхні залягає близько 30-метровий шар уламків лавобрекчій зі швидкістю 3,5 км/с, а нижче – глини з дрібними уламками лавобрекчій із швидкістю 2,2 км/с (рис. 6, а). Друга інверсія (у нижньому півпросторі моделі) пов’язана з переходом від шару андезитів у діапазоні глибин між 150 і 250 м до шарів, сформованих туфами, з швидкостями v_p відповідно 4,7 і 3,0 км/с. Така будова, радше, є результатом впливу вулканічних процесів, поширених у цій частині Закарпатського прогину у геологічному минулому. На самій поверхні залягає шар глин товщиною лише 5 м і з швидкістю 1,2 км/с. Хоч тонкий, але саме цей контрастний шар формує найамплітудніші резонанси – 28,7 (S) і 50,8 Гц (P) – у спектральному співвідношенні $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$, обчисленому для моделі за допомогою матричного методу (рис. 6, б). Це дуже близько до того, що дає для такого шару формула (1) – 30,3 (S) і 51,5 Гц (P), а відсутність повного збігу цілком зрозуміла з огляду на складність моделі. Зрозуміло і те, що істотного впливу на результати спостережень ці резонанси не матимуть не лише тому, що перебувають далеко за межами робочого діапазону приладів, а й з огляду на те, що корисні сейсмічні сигнали таких частот у своєму складі практично не містять. Натомість у спектральному співвідношенні на рис. 6 помітно доволі амплітудні резонанси на 3,3, 7,8 і 12,8 Гц (S) і 4,9, 10,8 Гц (P) – сформовані під впливом інших шарів – що перебувають у робочому діапазоні сейсмографів СКД, якими обладнано станцію, або близькі до нього. Часова форма спектрального співвідношення (рис. 6, в) теж складніша, ніж у Троснику, але і на ній помітні піки, пов’язані з приходом фаз, сформованих у поверхневому шарі. Перші сотні метрів глибинного розрізу поблизу сейсмічної станції Міжгір’я складаються здебільшого з різних аргілітів із швидкостями v_p в діапазоні від 2,3 до 3,3 км/с (рис. 7, а). Лише на поверхні залягає тонкий десятиметровий шар суглинків і вулканічно-галькової суміші з дуже контрастною швидкістю 0,7 км/с. Саме йому належать найамплітудніші резонанси у спектральному співвідношенні $u_x^{(0)}/u_z^{(0)}$, обчисленому для моделі Міжгір’я за допомогою матричного методу (рис. 7, б). Ці частоти майже збігаються з обчисленими для такого шару з використанням формули (1) – 10,4 (для S-хвиль) і 17,8 Гц (для P) – і перебувають практично за межами робочого діапазону апаратури (давачі СМЗ-КВ), встановленої на станції. Однак, наявні і резонанси на нижчих частотах – 5,4 (S) і 2,9 і 6,9 Гц (P), які можуть впливати на результати вимірювань на станції [Гнип, 2012]. Часова форма спектрального співвідношення (передавальна функція середовища) теж – як і в попередніх прикладах – містить піки основних фаз, які формуються саме контрастним поверхневим шаром (рис. 7, в).

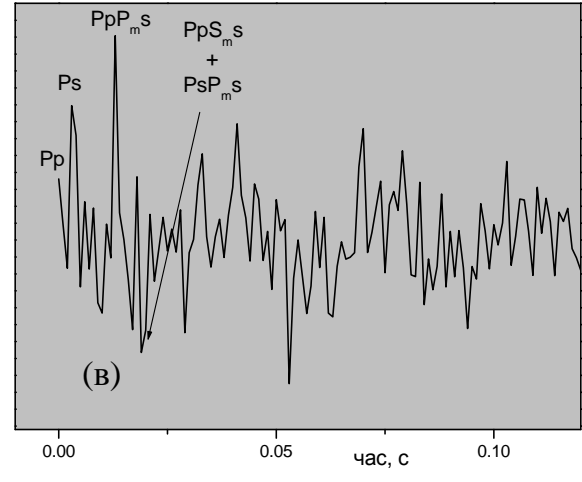
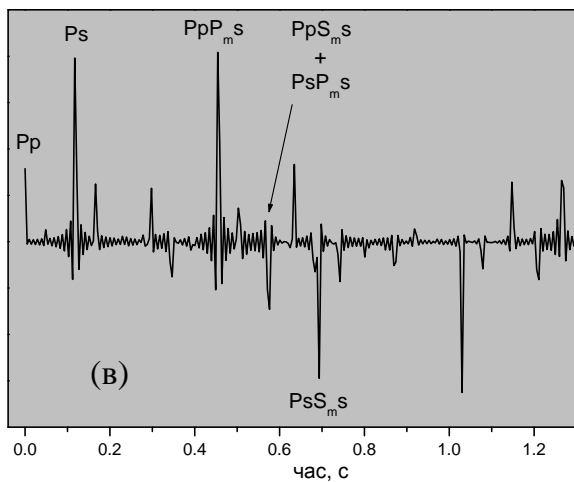
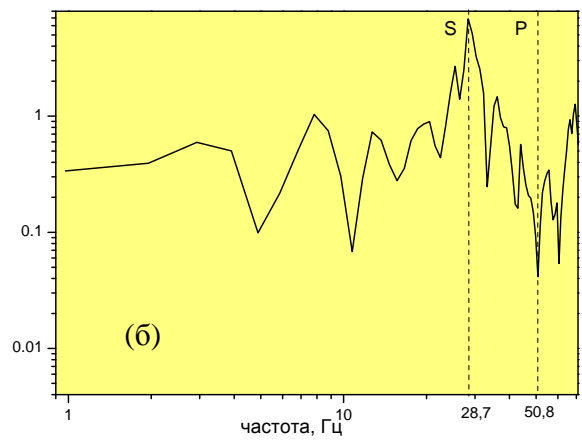
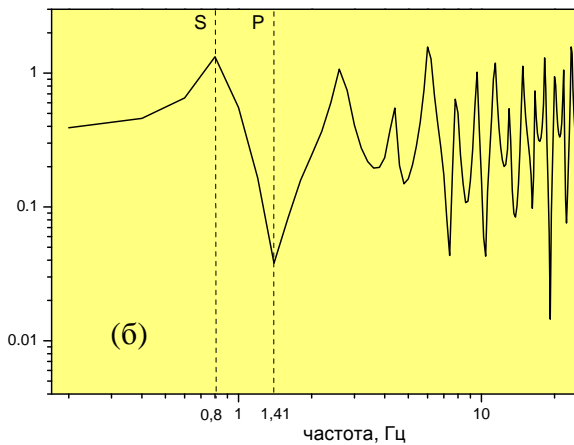
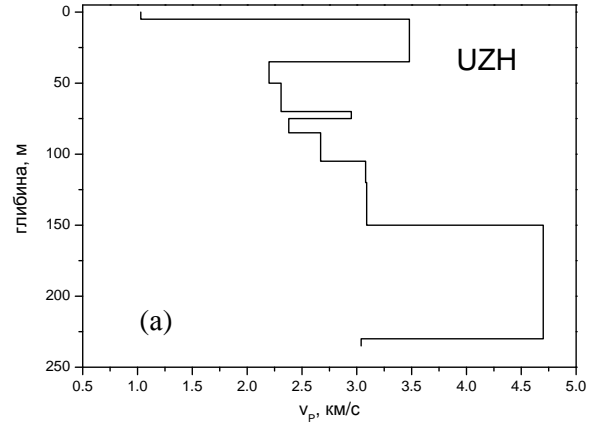
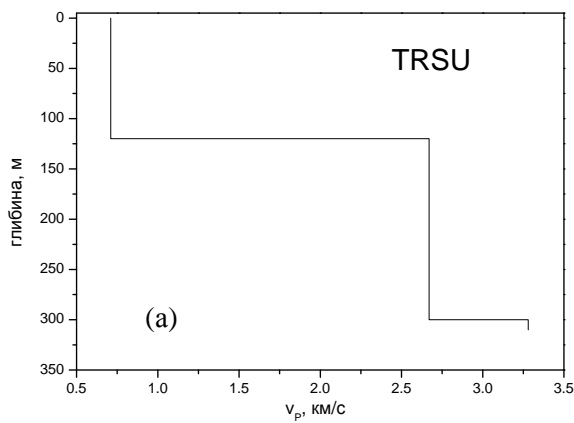


Рис. 5. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією Тросник (а), спектральне співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень для цієї моделі у частотній (б) і часовій (в) ділянках
Fig. 5. Velocity model under the station Trosnyk (a), and spectral ratio between horizontal and vertical components of displacements for the model in frequency (b) and time (v) domain

Рис. 6. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією Ужгород (а), спектральне співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень для цієї моделі у частотній (б) і часовій (в) ділянках
Fig. 6. Velocity model under the station Uzhgorod (a), and spectral ratio between horizontal and vertical components of displacements for the model in frequency (b) and time (v) domain

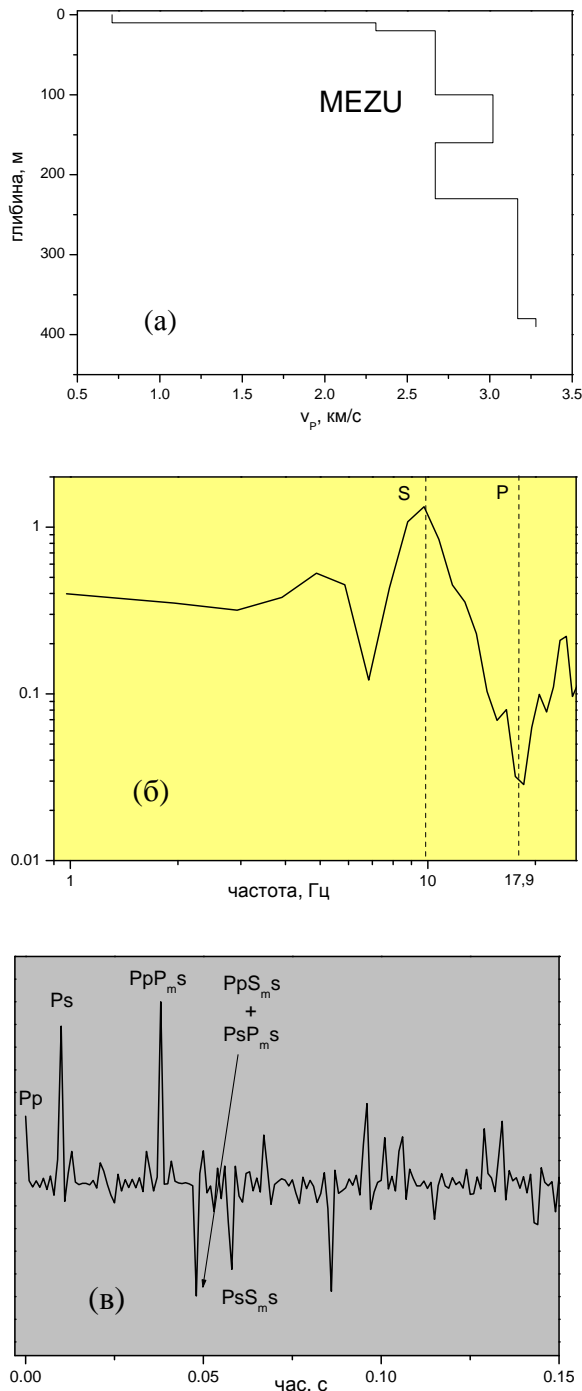


Рис. 7. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією Міжгір'я (а), спектральне співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень для цієї моделі у частотній (б) і часовій (в) ділянках
Fig. 7. Velocity model under the station Mizhigirya (a), and spectral ratio between horizontal and vertical components of displacements for the model in frequency (b) and time (c) domain

Наукова новизна

Уперше за швидкісними моделями перших сотень метрів шаруватого середовища під сейсмічними станціями Карпатської мережі (Тросник, Ужгород і Міжгір'я), побудованими за даними буріння, обчислено з використанням матричного методу спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні (або т.зв. частотні характеристики середовища), які – якщо джерелом коливань є плоска хвиля – залежать лише від властивостей середовища і характеризують його резонансні властивості.

Практична значущість

Спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні, обчислені у роботі для приповерхневих шарів середовища під сейсмічними станціями Карпатської мережі (Тросник, Ужгород і Міжгір'я), побудованими за даними буріння, дають можливість оцінити ступінь впливу середовища на записи сейсмічних сигналів на станціях, який буде найбільший на частотах, що відповідають отриманим інтерференційним резонансним максимумам (і мінімумам). Ці частоти необхідно також врахувати під час оцінювання параметрів можливого сейсмічного впливу на цій території.

Висновки

Ідеальним спектральним співвідношенням між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні для середовища під сейсмічною станцією була б рівна (без максимумів і мінімумів) горизонтальна лінія (або одиничний імпульс у часовій ділянці). Однак, це можливо лише тоді, коли під станцією немає сейсмічних границь (однорідне ідеально пружне середовище). Наближена ситуація трапляється лише там, де станції розташовані безпосередньо на виходах корінних (консолідованих) порід. Спектральні співвідношення між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень на вільній поверхні (передавальні функції у часовій ділянці), обчислені за допомогою матричного методу для горизонтально-шаруватих моделей перших сотень метрів середовища під сейсмічними станціями Карпатської мережі Тросник, Ужгород і Міжгір'я, побудованими за даними буріння поблизу цих станцій, що виявилися далекими від "ідеальних", дають можливість оцінити ступінь впливу середовища на записи сейсмічних сигналів на станціях, який буде найбільший на частотах, що відповідають отриманим інтерференційним резонансним максимумам (і мінімумам).

Особливо важливо врахувати цей вплив під час визначення динамічних характеристик вогнищ землетрусів, зокрема, т.зв. частоти зрізу, яка

насправді може виявитися проявом інтерференційного мінімуму, зумовленого будовою середовища. З огляду на це оцінки сили землетрусів, які здійснюються за амплітудою фаз на їхніх записах, або тривалістю збуджених ними коливань у певному амплітудному діапазоні, теж можуть виявитися хибними. Максимуми спектрального співвідношення відповідають частотам, на яких відбувається інтерференційне підсилення горизонтальних коливань відносно вертикальних і на яких можуть у разі їхнього збігу з частотами власних коливань споруди, або її частин виникати небезпечні явища резонансного підсилення і руйнування. Ці частоти необхідно враховувати під час оцінювання параметрів можливого сейсмічного впливу на цій території.

Головні резонансні максимуми у спектральних співвідношеннях між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень, обчислених для станцій “Ужгород” і “Міжгір’я”, належать найтоншим (не більше від десяти метрів) поверхневим шарам переважно глинистих відкладів і перебувають у високочастотних ділянках спектра практично поза межами робочого діапазону приладів, мінімально впливаючи на результати спостережень на станціях. Однак, на відміну від методу Накамури, у якому можна оцінити товщину/резонансний максимум лише одного (зазвичай поверхневого) шару, спектральні співвідношення, обчислені за допомогою матричного методу, дали змогу виявити й інші резонансні максимуми, зумовлені складнішою будовою середовища, зокрема такою, як під сейсмічною станцією Ужгород, які натомість перебувають вже у межах робочого діапазону приладів і які необхідно враховувати. Незважаючи на те, що моделі середовища під іншими двома станціями (Тросник і Міжгір’я) були дещо простіші, виразні резонансні максимуми у робочих ділянках спектра були виявлені і тут.

Використовувати матричний метод для обчислення спектральних співвідношень між горизонтальною і вертикальною компонентами переміщень й оцінювання резонансних частот можливо лише за наявності реалістичної моделі середовища. Дані буріння, за якими побудовано моделі у поточній роботі, є однак не всюди. Тому актуальним залишається завдання з’ясування придатності для оцінювання резонансних частот методу Накамури [Nakamura, 1989], яке у наступній роботі пропонується здійснити шляхом порівняння експериментальних спектральних співвідношень, обчислених за реальними записами на станціях, з теоретичними, обчисленими за допомогою матричного методу.

Література

Азими Ш. А. Динамические и кинематические особенности импульсов распространяющихся в среде с поглощением и дисперсией фазовой скорости / Азими Ш. А., Калинина А. В.,

- Калинин В. В., Пивоваров В. Л. // Вест. Моск. ун-та. Сер. Геол. – 1967. – № 1. – С. 32–36.
- Аранович З. И. Широкополосные среднепериодные велосиметры на базе сейсмометра СМЗ-КВ с обратной связью / Аранович З. И., Токмаков В. А., Трапезников Н. Л. // Сейсмические инструменты. – 1996. – № 25/26. – С. 111–118.
- Вербицкий С. Т. Сучасні засоби отримання та обробки сейсмологічної інформації / Вербицкий С. Т., Вербицкий Ю. Т. // Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. – К.: Наук. думка, 2005. – С. 80–86.
- Вербицкий Т. З. Математическое моделирование в сейсморазведке / Вербицкий Т. З., Починайко Р. С., Стародуб Ю. П., Федоришин А. С. – К.: Наук. думка, 1985. – 275 с.
- Гнип А. Теоретичні й експериментальні спектри Н/V для середовища під сейсмічною станцією “Міжгір’я” / Гнип А. // Матеріали наукової конференції “Сейсмологічні дослідження в сейсмоактивних регіонах”, 29–30 травня 2012 р. – Львів, 2012. – С. 37–40.
- Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород (Петрофизика) / Под ред. В. Н. Дахнова. – М., 1962. – 490 с.
- Козловський Е. М. Розрахунок та аналіз азимутальних коефіцієнтів q_i для Закарпатського сейсмоактивного регіону / Козловський Е. М., Малицький Д. В., Павлова А. Ю. // Геодинаміка. – 2013. – № 2(15) – С. 265–276.
- Кутас В. В. Карпатский годограф Р- и S-волн и неоднородности литосферы / Кутас В. В., Руденская И. М., Калитова И. А. // Геофиз. журн. – 1999. – Т. 21, № 3. – С. 45–55.
- Кутас В. В. Природа объемных волн, регистрируемых в Закарпатье при коровых землетрясениях и промышленных взрывах / Кутас В. В., Дрогичкая Г. М., Корчагин И. Н. // Геофиз. журн. – 2003. – Т. 25, № 6. – С. 3–14.
- Назаревич Л. Є. Уточнення параметрів карпатських землетрусів з урахуванням глибинної будови літосфери регіону та усереднених кінематичних нев’язок сейсмічних хвиль / Назаревич Л. Є., Назаревич А. В. // Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія.– 2004. – № 29–30. – С. 83–88.
- Назаревич Л. Є. Методики уточнення параметрів гіпоцентрів Карпатських землетрусів / Назаревич Л. Є., Назаревич А. В. // Геодинаміка.– 2004. – № 1 (4). – С. 53–62.
- Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протождяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
- Хоменко В. І. Глибинна будова Закарпатського прогину / Хоменко В. І. – К.: Наук. Думка, 1971. – 231 с.
- Хоменко В. И. Глубинная структура юго-западного края Восточно-Европейской платформы /

- Хоменко В. И. – К. : Наук. Думка, 1987. – 140 с.
- Gnyр A. Refining locations of the 2005 Mukacheve, West Ukraine, earthquakes based on similarity of their waveforms / Gnyр A. // *Acta Geophysica*. – 2009. – Vol. 57, No. 2. – P. 330–345, doi: 10.2478/s11600-008-0071-5.
- Gnyр A. Refining locations of the 2005-2006 recurrent earthquakes in Mukacheve, West Ukraine, and implications for their source mechanism and the local tectonics / Gnyр A. // *Acta Geophysica*. – 2010. – 58, No. 4. – P. 587–603, doi: 10.2478/s11600-010-0006-9.
- Ibs-von Seht M. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments / Ibs-von Seht M., and Wohlenberg J. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1999. – Vol. 89, No. 1. – P. 250–259.
- Assessment of Site Effects in Alpine Regions through Systematic Site Characterization of Seismic Stations / Michel C., Edwards B., Poggi V., Burjánek J., Roten D., Cauzzi C., and Fäh D. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2014. – Vol. 104, No. 6. – P. 2809–2826, doi: 10.1785/0120140097.
- Nishitsuji Y. Global-Phase H/V Spectral Ratio for Delineating the Basin in the Malargüe Region, Argentina / Nishitsuji Y., Ruigrok E., Gomez M., and Draganov D. // *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 / Nakamura Y. // *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. – 1989. – Vol. 30, No. 1. – P. 25–33.
- Starodub G. Models of the Earth's Crust Structure in the East Carpathian Region determined from Inversion of Farfield P-waveforms / Starodub G., Gnyр A. // *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 / Tsai N. C. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1970. – Vol. 60, No. 3. – P. 795–808.

А. Р. ГНЬР

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

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

Цель. С целью получения количественных оценок динамических параметров влияния особенностей скоростного строения среды под сейсмическими станциями для трех станций Карпатской сети с использованием моделей, построенных по данным бурения в приповерхностных слоях, и алгоритма, разработанного на основе матричного метода, рассчитаны спектральные соотношения между горизонтальными и вертикальными составляющими смещений на свободной поверхности (частотные характеристики), которые зависят только от свойств среды и характеризуют ее резонансные свойства.

Методика. В методическом аспекте проверена степень совпадения интерференционных резонансных частот в идеально-упругой слоистой среде, рассчитанных с использованием разработанного алгоритма для источника в виде плоской волны, и прогнозируемых по методу Накамуры, а в следующей работе будет оценена степень их совпадения с частотами экспериментальных характеристик, рассчитанных с использованием реальных записей шумов и землетрясений, перспектива использования этих методов в региональных сейсмологических исследованиях.

Результаты. Главные резонансные максимумы в спектральных соотношениях между горизонтальной и вертикальной составляющими смещений, рассчитанных для станций Ужгород и Межгорье, принадлежат самым тонким (не больше десяти метров) поверхностным слоям преимущественно глинистых отложений и находятся в высокочастотных участках спектра практически за пределами рабочего диапазона приборов, оказывая таким образом минимальное влияние на результаты наблюдений на станциях. Тем не менее, в отличие от метода Накамуры, в котором можно оценивать толщину/резонансный максимум только одного (как правило поверхностного) слоя, спектральные соотношения, рассчитанные с помощью матричного метода, позволили обнаружить и другие максимумы, обусловленные более сложным строением среды, и в частности таким, как под станцией Ужгород, которые находятся уже в пределах рабочего диапазона приборов и должны учитываться. Несмотря на то, что модели среды под остальными двумя станциями (Тросник и Межгорье) оказались более простыми, четкие резонансные максимумы в рабочих участках спектра обнаружены и тут.

Научная новизна. Впервые с использованием скоростных моделей первых сотен метров слоистой среды под тремя сейсмическими станциями Карпатской сети, построенных по данным бурения, рассчитаны с помощью матричного метода частотные характеристики, которые зависят только от свойств среды и характеризуют ее резонансные свойства.

Практическая значимость. Рассчитанные частотные характеристики позволяют оценить степень воздействия среды на записи сейсмических сигналов на станциях, которое будет наиболее существенным на частотах, соответствующих полученным интерференционным максимумам (и минимумам). Эти частоты необходимо учитывать при

анализе и интерпретации записей сейсмических сигналов, оценивании параметров возможного сейсмического воздействия и т.п.

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

A. R. GNYP

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

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

Purpose. In order to quantitatively estimate the dynamic effects of velocity structure under the three seismic stations of the Carpathian network spectral ratios between horizontal and vertical components of displacements on the free surface (frequency characteristics) depending only on parameters of the medium and defining its resonance properties have been calculated using the algorithm designed based on matrix method and the models constructed using the data of drilling in near surface layers. **Methodology.** In methodical aspect, it has been tested if interferential resonance frequencies in perfectly elastic layered medium calculated using the developed algorithm and plane wave as a source coincide with ones predicted by Nakamura's technique. In the following paper, it is intended to check if the frequencies coincide with ones identified in experimental characteristics calculated using the real records of seismic noise and earthquakes, and the applicability of the methods in the regional seismological studies. **Results.** The major resonance maxima in spectral ratios between horizontal and vertical components of displacements calculated for stations Uzhgorod and Mizhgirya corresponded to the thinnest (less than ten meters) surface layers of predominantly clay deposits, and occurred consequently within the high-frequency parts of spectrum, virtually outside the working range of equipment, and with no effect on the results of observations at the stations. However, in contrast to the Nakamura's technique, enabling to estimate thickness/resonance maximum of only one (usually surface) layer, it is possible, calculating spectral ratios using the matrix method, to identify other maxima, resulting from the more complex structure of the medium, and, in particular, such as under the station Uzhgorod, where the maxima have occurred within the working range of equipment and should be accounted for. Despite the simpler velocity structure under the two remaining stations (Trosnyk and Mizhgirya) the distinct resonance maxima within the working range of equipment have been identified there too. **Originality.** For the first time, frequency characteristics of the medium under the three seismic stations of the Carpathian network depending only on the parameters of the medium and defining its resonance properties have been calculated using the matrix method and velocity models of first hundreds of meters constructed based on the data of drilling. **Practical significance.** The resulting frequency characteristics enable to estimate the effect of the medium on the records of seismic signals, most significant at frequencies corresponding to interferential resonance maxima (and minima). The frequencies should be taken into consideration during the analysis and interpretation of seismic signals recorded at the stations, and in estimation of seismic risk and seismic hazard.

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

REFERENCES

- Azimi Sh. A., Kalinina A. V., Kalinin V. V., Pivovarov V. L. *Dinamicheskiye i kinematicheskiye osobennosti impulsov rasprostranyayushchikhsya v srede s pogloshcheniyem i dispersiyei fazovoi skorosti* [Dynamic and kinematic distinctions of pulses propagating through media with absorption and dispersion of phase velocity], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya Geologiya* [Bulletin of Moscow University, Series Geology], 1967, no. 1, pp. 32–36.
- Aranovich Z. I., Tokmakov V. A., Trapeznikov N. L. *Shyrokopolosniye srednepriodniye velosimetry na baze seismometra CM3-KV s obratnoi svyazyu* [Broadband midrange velocimeters based on seismometer CM3-KV with feedback], *Seismicheskiye instrumenty* [Seismic instruments], 1996, no. 25/26, pp. 111–118.
- Verbytskyi S. T., Verbytskyi Yu. T. *Suchasni zasoby otrymannya ta obrobky seismolohichnoyi informatsiyi* [Modern techniques for acquisition and processing of seismic data], *Doslidzhennya suchasnoyi heodynamiky Ukrayinskykh Karpat* [Studies on recent geodynamics of Ukrainian Carpathians], Kyiv, Naukova dumka, 2005, pp. 80–86.
- 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 seredovyschcha 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.

- Kobranova V. N. *Fizicheskiye svoistva gornyykh porod (Petrofizika)* [Physical properties of rocks (Petrophysics)] Ed. V. N. Dakhnova, Moscow, 1962, 490 p.
- Kozlovskiy E. M., Malyskiy D. V., Pavlova A. Yu. *Rozrakhunok ta analiz azymutalnykh koefitsiyentiv q_i dlya Zakarpatskoho seismoaktyvnoho rehionu* [Calculation and analysis of azimuthal coefficients q_i for the seismically active region of Zakarpattya], *Geodynamics*, 2013, no. 2(15), pp. 265–276.
- Kutas V. V., Rudenska I. M., Kalitova I. *Karpatskiy godograf P- i S-voln i neodnorodnosti litosfery* [Carpathian travel time tables of P- and S-waves and inhomogeneities of lithosphere], *Geophys. journal*, 1999, Vol. 21, no. 3, pp. 45–55.
- Kutas V. V., Drogitskaya G. M., Korchagin I. N. *Priroda obyomnykh voln, registriruyemykh v Zakarpatyie pri korovykh zemletryasenyakh i promyshlennykh vzryvakh* [Nature of body waves registered in Zakarpattya during crustal earthquakes and quarry blasts], *Geophys. journal*, 2003, Vol. 25, no. 6, pp. 3–14.
- Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V. *Utochnennya parametriv karpatskykh zemletrusiv z urakhuvannyam hlybynnoi budovy litosfery rehionu ta userednennykh kinematychnykh nevyazok seismichnykh khvyl* [Refining the parameters of the Carpathian earthquakes with accounting for deep interior structure of the lithosphere in the region and average kinematic offsets of seismic waves], *Bulletin of Kyiv Taras Shevchenko National University, Series Geology*, 2004, no. 29–30, pp. 83–88.
- Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V. *Metodyky utochnennya parametriv hipotsentriv Karpatskykh zemletrusiv* [Methods for refinement of hypocenters of Carpathian earthquakes], *Geodynamics*, 2004, no. 1(4), pp. 53–62.
- Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoistv gornyykh porod* [Reference book (cadastre) of physical properties of rocks], Ed. Melnikov N. V., Rzhavskiy V. V., Protodyakonov M. M., Moscow, Nedra, 1975, 279 p.
- Khomenko V. I. *Hlybynna budova Zakarpatskoho prohynu* [Deep structure of the Zakarpattya trough], Kyiv, Naukova dumka, 1971, 231 p.
- Khomenko V. I. *Glubinnaya struktura yugo-zapadnogo kraya Vostochno-Yevropeiskoi platformy* [Deep structure of the south-west edge of East-European platform], Kyiv, Naukova dumka, 1987, 140 p.
- Gnyp A. Refining locations of the 2005 Mukacheve, West Ukraine, earthquakes based on similarity of their waveforms. *Acta Geophysica*. 2009, Vol. 57, no. 2, pp. 330–345, doi: 10.2478/s11600-008-0071-5.
- Gnyp A. Refining locations of the 2005-2006 recurrent earthquakes in Mukacheve, West Ukraine, and implications for their source mechanism and the local tectonics. *Acta Geophysica*. 2010, 58, no. 4, pp. 587–603, doi: 10.2478/s11600-010-0006-9.
- 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.
- Michel C., Edwards B., Poggi V., Burjánek J., Roten D., Cauzzi C., and Fäh D. Assessment of Site Effects in Alpine Regions through Systematic Site Characterization of Seismic Stations. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2014, Vol. 104, no. 6, pp. 2809–2826, doi: 10.1785/0120140097.
- 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 20.08.2015 р.