

## Порівняння спектральних характеристик приповерхневих шарів під сейсмічними станціями «Тросник», «Ужгород», «Міжгір'я», розрахованих методом скінченних елементів, з експериментальними

*Б. Є. Купльовський, Т. Б. Брич, 2018*

Відділ сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики  
ім. С. І. Субботіна НАН України, Львів, Україна  
Надійшла 19 червня 2018 р.

Рассмотрено вычисление теоретических передаточных характеристик осадочных слоев под сейсмическими станциями Карпатской сейсмической сети «Тросник», «Ужгород» и «Межгорье» с использованием метода конечных элементов. Результаты вычислений использованы для сравнения с динамическими параметрами приповерхностных слоев, полученными экспериментальным методом; проверки соответствия резонансных свойств исследуемой среды, полученных этими методами, для возможности их применения в региональных сейсмологических исследованиях. При решении прямой динамической задачи сейсмике методом конечных элементов не утрачивается возможность учета различных обменных эффектов внутри модели, а также можно рассчитывать модели со сложным геометрическим строением среды и различными включениями. По разработанной методике моделирования волнового поля методом конечных элементов смоделированы колебания для моделей сейсмического сечения под станциями «Тросник», «Ужгород» и «Межгорье». По результатам моделирования рассчитаны теоретические спектральные соотношения для этих станций. Для сейсмической станции «Межгорье» получено совпадение двух интерференционных максимумов на частоте 4 и 10 Гц для экспериментального и теоретического графиков. Для сейсмической станции «Ужгород» графики, полученные экспериментальным и модельным методами, показали идентичное поведение во всем диапазоне частот, по этим графикам выделен стабильный источник шума в пределах города. Для сейсмической станции «Тросник» получено расхождение в поведении экспериментальных и модельных графиков выше 6 Гц. Такие результаты объясняются высоким уровнем грунтовых вод под сейсмической станцией, что не учитывалось при построении модели для расчета методом конечных элементов.

Впервые спектральные характеристики приповерхностных слоев под сейсмическими станциями «Тросник», «Ужгород», «Межгорье» рассчитаны методом конечных элементов. Проведено сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными измерениями. Информация о динамических параметрах верхних осадочных слоев под сейсмостанциями, которые в спектральном диапазоне выступают в качестве крупнейшего фильтра частот колебаний, позволит более точно интерпретировать события, зарегистрированные этими станциями. Рассчитанные спектральные соотношения дают возможность оценить степень влияния среды на записи сейсмических сигналов на станциях. Наибольшее влияние выявлено на частотах, соответствующих полученным резонансным максимумам и минимумам. Эти результаты необходимо также учитывать при оценке параметров возможного сейсмического воздействия на данной территории.

**Ключевые слова:** моделирование, метод конечных элементов, передаточная характеристика, метод Накамуры, резонансные частоты, интерференция.

**Вступ.** Тривалий досвід сейсмологічних досліджень засвідчує, що місцеві геологічні умови є вирішальним чинником масштабів і обсягу руйнувань, зумовлених землетрусами. Необхідність урахування цих умов при оцінюванні сейсмічної небезпеки і параметрів можливого сейсмічного впливу є цілком очевидною, навіть якщо йдеться про окремі будівельні майданчики і споруди, — адже доволі часто трапляються приклади повного руйнування одного будинку, розташованого поряд з іншим будинком такого самого запасу міцності, але повністю уцілілим. [Кендзера, 2015].

Амплітуда сейсмічних коливань підвищується передусім через акумулювання їх енергії у приповерхневих шарах середовища, де швидкість поширення коливань набагато менша, ніж на більшій глибині. Унаслідок наявності контрастних меж відбувається також інтерференційне підсилення коливань на частотах, що залежать від пружних характеристик шарів геометрії їхніх меж і кутів поширення коливань.

Найповніше врахування зазначених вище та багатьох інших чинників сейсмічного впливу можливе лише в разі проведення широкомасштабних і комплексних геологічних, геофізичних, сейсмологічних, геотехнічних та інженерних досліджень, пов'язаних із значними коштами, залученням адекватних матеріальних і технічних ресурсів тощо [Кендзера, 2010].

Один із найпоширеніших підходів оцінювання резонансних частот полягає у порівнюванні спектрів коливань, збуджених слабкими джерелами (малі землетруси, шум) і зареєстрованих на майданчиках на виході скельної основи й на осадовому шарі, що залягає на тих самих породах основи [Steidl, 1996; Abercrombie, 1997]. Як альтернативу до цього підходу, обмеженого у застосуванні тим, що виходи скельної основи поблизу оцінюваного майданчика трапляються не часто, було запропоновано так званий метод Накамури [Nakamura, 1989], у якому резонансні частоти оцінюють за спектральним співвідношенням горизонтальної і вертикальної компонент

коливань ( $H/V$ ), збуджених слабкими джерелами.

Метод Накамури, або метод QTS (quasi-transfer spectra technique — метод квазі-передавальних спектрів), набув великого поширення у світовій практиці сейсмологічних досліджень завдяки своїй зручності й дешевизні — він не потребує великих витрат часу, великої кількості апаратури, буріння свердловин для досягнення скельної основи. Його можна застосовувати практично на будь-якому майданчику. Втім теоретичні основи цього суто емпіричного методу досі належним чином не обґрунтовано. Автор методу стверджує, зокрема, що максимальні значення спектрального співвідношення  $H/V$  для мікросейсм зумовлені підсиленням і багатократним відбиттям поперечних коливань  $SH$  [Nakamura, 2000], але відкритим усе ж залишається питання щодо впливу на форму спектра  $H/V$  поверхневих коливань тощо [Langston, 2009].

Відомо, однак, що спектральне співвідношення  $H/V$  має чіткий фізичний зміст як на спектральній, так і на часовій ділянці, якщо середовище горизонтально-шарувате, а джерелом коливань є плоска хвиля (поздовжня або поперечна), що поширюється з глибини. Для певного хвильового числа (що відповідає за кутові падіння плоскої хвилі) ця функція залежить лише від параметрів середовища (товщин шарів, їхніх густин, швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у них) [Гнип, 2012], максимуми її спектра відповідають частотам, на яких відбувається інтерференційне підсилення горизонтальних коливань відносно вертикальних. У разі їх збігу з частотами власних коливань споруди або її частин можуть виникати небезпечні явища резонансного підсилення і руйнування.

За одночасного падіння кількох плоских хвиль співвідношення  $H/V$  залежатиме вже не лише від параметрів середовища, а й від амплітуди і фази коливань у кожній із них, утім припущення про горизонтально-шарувату будову середовища і плоску хвилю як джерело коливань усе ж цілком адекватне і прийнятне для вирішення ба-

гатьох практичних завдань. Дійсно, розташування вогнищевих зон землетрусів, які можуть становити реальну небезпеку у певній місцевості, зазвичай відоме, що при відомих параметрах середовища дає змогу оцінити кут падіння хвильового фронту з найбільшою енергією коливань, а відтак, обчислити й відповідне теоретичне спектральне співвідношення  $H/V$ . Порівнявши теоретичні співвідношення  $H/V$  з експериментальними, можна оцінити доцільність використання лише останніх, коли даних щодо параметрів середовища, потрібних для обчислення теоретичних  $H/V$ , обмаль.

Для горизонтально-шаруватого середовища спектральні співвідношення  $H/V$  найзручніше обчислювати безпосередньо на ділянці частот і хвильових чисел з використанням так званого матричного методу, уперше запропонованого Томсоном і Хаскелом [Thomson, 1950; Haskell, 1953], і його численних модифікацій. Якщо геометрія сейсмічних меж істотно відхиляється від горизонтально-шаруватої, то для моделювання сейсмічних хвильових полів найчастіше використовують метод скінченних елементів (МСЕ) [Bathe, 1982], універсальніший за можливостями і сферою застосування, ніж матричний. Оскільки обчислення за МСЕ здійснюються у реальному часі, а не в діапазоні частот і хвильових чисел, як у матричному, можуть виникати труднощі зі збіжністю результатів, отриманих цими методами при розв'язуванні тих самих задач. Зокрема, це стосується й обчислення спектрів  $H/V$  для горизонтально-шаруватого середовища. Досягнення цієї збіжності є важливою складовою напрацювання методичних засад використання МСЕ для визначення резонансних частот у середовищах зі складнішою будовою. При цьому йдеться й про так звані осадові басейни, де на формування резонансних максимумів можуть істотно впливати відбиття від їхніх бортів, урахування яких залишається актуальним завданням при оцінюванні сейсмічного впливу.

**Мета** — обчислення теоретичних передавальних характеристик осадових шарів під сейсмічними станціями Карпатської

сейсмічної мережі «Тросник», «Ужгород» та «Міжгір'я» за МСЕ. Ці результати використано для порівняння динамічних параметрів приповерхневих шарів, отриманих експериментальним методом, а також для перевірки відповідності резонансних властивостей, отриманих цими методами, і можливості їх використання в регіональних сейсмологічних дослідженнях.

**Методика.** При розв'язанні прямої задачі сейсміки слід використовувати математичні методи моделювання, що дає змогу враховувати різні види і форми неоднорідностей, а також складну будову осадового шару. На цей час загальноприйнятими є два методи розрахунку шаруватих середовищ: матричний та МСЕ. У матричному методі середовище зображують ідеально пружними або поглинальними горизонтально-шаруватими моделями.

Передавальні характеристики середовища під станціями «Тросник», «Ужгород», «Міжгір'я» обчислено матричним методом та порівняно з експериментальними даними [Гнип, 2015, 2016].

Дослідження полягає у розв'язанні прямої динамічної задачі сейсміки МСЕ. Цей метод математичного моделювання дає змогу розраховувати моделі складної будови. При розв'язанні прямої динамічної задачі сейсміки цим методом існує можливість враховувати різні обмінні ефекти всередині моделі, а також моделювати середовище з різною складною геометричною та фізичною будовою.

**Основи теорії методу Накамури.** Метод визначення власних резонансних частот осадової товщі за допомогою відношення спектрів горизонтальної і вертикальної компонент природних шумів розробив японський вчений Yutaka Nakamura з використанням свердловинних досліджень сильних рухів для різноманітних геологічних умов досліджуваної ділянки. Він висунув гіпотезу про те, що вертикальна компонента природних шумів геологічного середовища містить характеристику середовища на всьому шляху проходження хвилі від джерела до поверхні осадової товщі, з відносним впливом хвиль Ре-



лея в осадовій товщі. Тому зазначену компоненту можна використовувати для вилучення впливу джерела та ефекту хвиль Релея з горизонтальної компоненти. Це дає змогу визначити власні резонансні частоти осадового шару разом з коефіцієнтами підсилення, тобто амплітудно-часову характеристику (АЧХ), яка реалістичніше відобразатиме властивості середовища, ніж ті, що отримані за відношенням характеристик осадової товщі та скельних порід. Як показано роботами багатьох дослідників, методику  $H/V$  можна успішно застосовувати для визначення власних резонансних частот і коефіцієнтів підсилення осадової товщі. Автор методу показав, що максимальні значення відношення спектрів горизонтальної і вертикальної компонент мікросейсм зумовлені багатократними відбиттями  $SH$  хвилі.

Максимальні значення QTS відповідають власним частотам першого порядку осадового шару, що виділяються завдяки багатократним відбиттям  $SH$  хвилі, і коефіцієнтам підсилення:

$$QTS = \frac{H_f}{V_f} = \frac{A_h H_b + H_s}{A_v V_b + V_s} = \frac{H_b}{V_b} \cdot \frac{A_h + H_s/H_b}{A_v + V_s/V_b},$$

де  $A_h$  і  $A_v$  — коефіцієнти підсилення відповідно горизонтальної та вертикальної складових вертикально падаючої об'ємної хвилі;  $H_b$  і  $V_b$  — спектри горизонтальних і вертикальних коливань в основі осадового басейну;  $H_s$  і  $V_s$  — спектри горизонтальної та вертикальної складових хвиль Релея;  $H_f$ ,  $V_f$  — горизонтальна і вертикальна складові спектрів коливань на поверхні [Вербицький та ін., 2011].

**Основи методу скінчених елементів для моделювання хвильового поля.** Для моделювання хвильових полів у гірських породах складної структури розв'язуємо динамічну задачу теорії пружності, враховуючи нелінійні явища.

Суть МСЕ полягає в апроксимації неперервних величин кусково-неперервними функціями на скінченній кількості підобластей — елементів. Цими функціями можуть бути поліноми, які визначають для кожного елемента окремо. Порядок

полінома залежить від форми елемента і кількості вузлів в елементі.

Використавши метод переміщень в МСЕ, вектор переміщень  $\mathbf{u}$  апроксимуємо на кожному скінченному елементі через значення переміщень у вузлах елемента  $\mathbf{U}$  у матричному записі

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}^{(e)} \mathbf{U}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{N}^{(e)}$  — матриця функцій форми.

Залежність між деформаціями і переміщеннями для елемента (e) запишемо у вигляді

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}^{(e)} \mathbf{U}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{B}^{(e)}$  — диференціальний оператор [Тимошенко, 1975; Ильюшин, 1978; Седов, 1984].

Закон Гука запишемо у вигляді

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^{(e)} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{D}^{(e)}$  — матриця пружних характеристик елемента (e).

Уведемо позначення для матриці жорсткості:

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} \mathbf{B}^{(e)T} \mathbf{D}^{(e)} \mathbf{B}^{(e)} dv,$$

і вектора навантаження:

$$\mathbf{f} = \sum_{e=1}^E \mathbf{f}^{(e)},$$

де

$$\mathbf{f}^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{F} dv + \int_{S^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{P}_2 ds + \mathbf{P}_1$$

є сумою прикладених ззовні тисків, поверхневих і точкових зусиль. Тут  $\mathbf{F}$  — вектор об'ємних сил;  $\mathbf{P}_2$  — вектор поверхневих сил;  $\mathbf{P}_1$  — вектор зосереджених у вузлах сил. В цих формулах (e) — номер розглядуваного елемента;  $E$  — загальна кількість елементів, на які розбито модель;  $V^{(e)}$ ,  $S^{(e)}$  — об'єм і площа конкретного розглядуваного елемента відповідно.

У результаті отримаємо скінченну систему лінійних алгебричних рівнянь щодо вектора переміщень у вузлах розбиття  $\mathbf{U}$ , яка у матричному зображенні має вигляд

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{f}, \quad (5)$$

На підставі принципу д'Аламбера інерційні і дисипативні сили розподілені за об'ємом, отже, їх можна розглядати як частину об'ємних сил [Бате, 1982]. Взявши до уваги інерційні сили в елементарному об'ємі  $\rho \dot{\mathbf{U}}$  (де  $\rho$  — густина тіла;  $c \dot{\mathbf{U}}$  — дисипативна складова;  $c$  — коефіцієнт згасання в одиниці об'єму, який визначають експериментально), дискретизацію моделі на скінченне число елементів і лінійну апроксимацію  $\mathbf{u}$  (1), для інерційної і дисипативної компонент об'ємної сили у правій частині рівності (4) маємо

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}. \quad (6)$$

Тут

$$\mathbf{M} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} \rho_c \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{N}^{(e)} dv, \\ \mathbf{f}_D = \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}, \quad (7)$$

де

$$\mathbf{C} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} c_e \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{N}^{(e)} dv.$$

Тут інерційна  $\mathbf{f}_i$  і дисипативна  $\mathbf{f}_D$  сили напрямлені проти руху, через що мають протилежний знак. Після перенесення  $\mathbf{f}_i$ ,  $\mathbf{f}_D$  з рівностей (6), (7) у ліву частину рівняння (5) отримуємо рівняння руху у матричній формі:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{f}, \quad (8)$$

де  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_C + \mathbf{f}_P$  — сума концентрованих сил (джерел) і поверхневих на межах неоднорідних шарів, залежних від часу. Рівняння (8) є математичним виразом другого закону Ньютона. Матриця  $\mathbf{C}$  враховує згасання. Її можна визначити як суму:  $\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$ , за Релеєм, де коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  визначають залежно від експериментальних даних [Bathe, 1982].

Доповнивши систему звичайних диференціальних рівнянь (8) початковими умовами, в яких задано значення переміщень і швидкостей переміщень у початковий момент часу у вузлах розбиття, отримуємо дискретизовані початкові умови:

$$\mathbf{U}_{t=0} = \mathbf{U}_0, \quad \dot{\mathbf{U}}_{t=0} = \dot{\mathbf{S}}_0. \quad (9)$$

Маємо постановку динамічної задачі для МСЕ [Hutton, 2004; Singiresu, 2004; Zhangxin, 2005]. Для розв'язання системи (8), (9) можна застосовувати різні підходи, такі як метод розкладу за власними формами, або ітераційні методи, такі як методи центральних різниць, Хаболта, Ньюмарка або  $\Theta$ -метод Вілсона [Zienkiewicz et al., 2005], або розроблені та апробовані авторами ітераційні схеми [Брич, 2010; Купльовський, 2010].

Напружено-деформований стан розраховано, виходячи з отриманих значень глобального вектора переміщень  $\mathbf{U}$  за формулами (1)—(3). Було використано лінійні трикутні елементи. Вони задовольняють умови неперервності апроксимованої величини не лише у вузлах, як елементи вищих порядків, а й на ребрах. Крім того, ці елементи достатньо прості для необхідного в процесі розрахунку аналітичного інтегрування і використання в програмі отриманих виразів. Зазначені елементи мають шість степенів вільності, три вузли, характеризуються густиною  $\rho$ , модулем Юнга  $E$  і коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ , які можна перерахувати у швидкості поздовжніх  $V_P$  і поперечних  $V_S$  хвиль за потреби, застосувавши відомі формули:

$$E = \frac{V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2) \rho}{V_P^2 - V_S^2}, \quad \nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}.$$

**Результати.** За розробленою методикою моделювання хвильового поля МСЕ було змодельовано коливання для моделей сейсмічного перерізу під станціями «Тросник», «Ужгород» та «Міжгір'я». За результатами моделювання розраховано теоретичні спектральні співвідношення для цих станцій.

Розрахунок експериментальних спектральних співвідношень для станцій «Тросник», «Ужгород», «Міжгір'я» Карпатської сейсмологічної мережі для записів землетрусів цієї мережі наведено у статті [Гнип, 2016]. З ними порівнено теоретичні спектральні співвідношення, що отримані за допомогою МСЕ.

Побудовано швидкісну модель середовища під сейсмічною станцією «Міжгір'я»

(рис. 1, табл. 1). Для побудови моделей використано дані щодо складу порід керна свердловин, пробурених поблизу режимних геофізичних станцій Карпатської мережі «Міжгір'я», «Ужгород» і «Тросник», де ведуться постійні сейсмологічні спостереження. Розподіл швидкості  $V_p$  з глибиною визначено за літературними даними [Кобранова, 1962; Справочник, 1975] стосовно типових діапазонів її значень у породах відповідного типу (табл. 1). Швидкість  $V_s$  в усіх шарах було взято в 1,7 рази менше за швидкість  $V_p$ , а для густини використано квадратичну апроксимацію її залежності від  $V_p$  з коефіцієнтами, визначеними за даними [Азими и др., 1967, Starodub, Снур, 1999]. На графіках, отриманих експериментально і за теоретичним методом (рис. 2), бачимо збіг двох інтерференційних максимумів на частоті 4 і 10 Гц.

Побудовано швидкісну модель середовища під сейсмічною станцією «Ужгород» (рис. 3, табл. 2). На графіках рис. 4, отриманих експериментально і за теоретичним методом, бачимо практично однакову поведінку двох кривих, крім максимуму на частоті 15 Гц, який є на експериментальній кривій і відсутній — на теоретичній. Така ситуація наптовхує на думку про стабільне джерело шуму в межах міста; у разі неадекватності побудови моделі ці криві не мали б майже подібної форми в усьому діапазоні частот. Джерела сейсмічних коливань на високих частотах малопотужні і характеризуються малою проникною здатністю у середовищі, тому можна говорити про досить невелику відстань від джерела збурення до сейсмостанції.

Отже, зроблено методологічний висновок: такий підхід потрібно використовувати для виділення шумів техногенного походження із частотних записів сейсмостанцій, що розташовані в межах густонаселених районів і з можливими об'єктами, які генерують постійні коливання під час своєї діяльності. Для таких досліджень необхідною умовою є наявність повного інженерно-геологічного розрізу під станцією і точна побудова математичної моделі середовища.

Побудовано швидкісну модель середовища під сейсмічною станцією «Тросник» (рис. 5, табл. 3). Незважаючи на відносно просту модель середовища під станцією (три шари з різними властивостями), на графіках рис. 6, отриманих числовим методом та інструментальним способом, бачимо досить різну поведінку кривих. Графік відношення спектрів коливань, отриманий МСЕ, має лише один чіткий максимум на частоті 3 Гц, що цілком природно для такої простої моделі. Графік відношення спектрів, отриманий для коливань, зареєстрованих інструментальним способом, демонструє зовсім іншу поведінку резонансних характеристик середовища: пік на частоті 3 Гц, що повторює модельні результати, а також великий пік на частоті 7 Гц і дещо менші максимуми на частотах 9, 13, 15, 17 Гц, хоча на графіку модельного експерименту таких максимумів немає і він веде себе, як горизонтальна лінія на частотах понад 6 Гц.

Подібну поведінку графіків, отриманих двома різними методами, можна пояснити такими чинниками. Сейсмічна станція «Тросник» розташована у заплаві р. Тиса, з високим рівнем ґрунтових вод під станцією, для розрахунку МСЕ було враховано тільки просту модель пружності Мора, яка не дає змоги врахувати такі особливості моделі без заміни самих фізичних характеристик моделі.

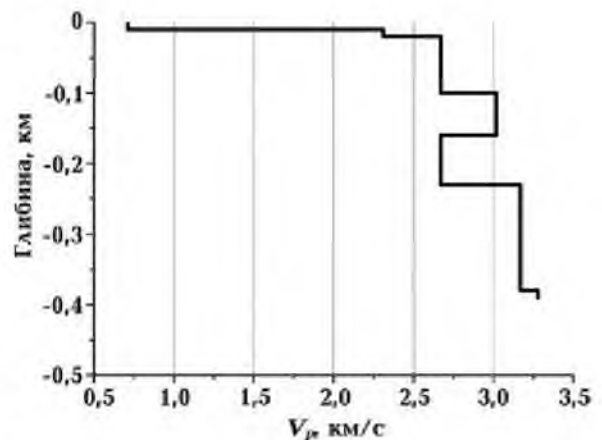


Рис. 1. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією «Міжгір'я».



Таблиця 1. Характеристики моделі «Міжгір'я»

$H, \text{ м}$	$V_p, \text{ м/с}$	$V_s, \text{ м/с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
10	710	418	1545
20	2310	1359	2089
100	2670	1571	2205
160	3020	1776	2316
230	2670	1571	2205
380	3170	1865	2363
500	3280	1929	2398

**Наукова новизна і практична значущість.** Уперше спектральні характеристики приповерхневих шарів під сейсмічними станціями «Тросник», «Ужгород» та «Міжгір'я» розраховано методом скінченних елементів. Результати математичного моделювання було порівняно з експериментальними вимірюваннями. Знання про динамічні параметри верхніх осадових шарів під сейсмостанціями, які у спектральному діапазоні є найбільшим фільтром частот коливань, дасть змогу точніше інтерпретувати події, зареєстровані цими станціями.

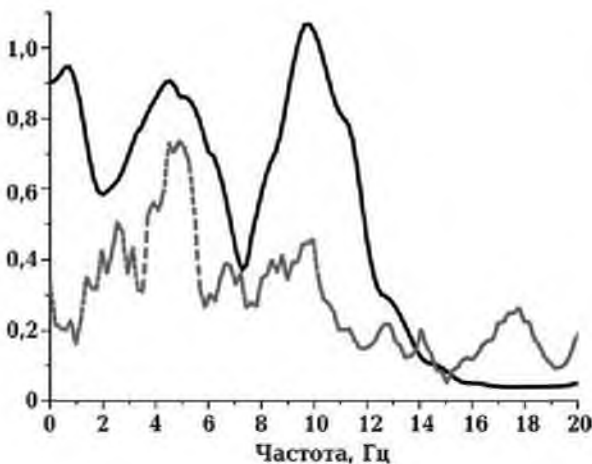


Рис. 2. Відношення спектрів коливань горизонтальної компоненти до вертикальної під сейсмічною станцією «Міжгір'я». Суцільна чорна лінія — відношення спектрів коливань, змодельованих методом скінченних елементів, сіра лінія — відношення зареєстрованих спектрів коливань.

Таблиця 2. Характеристики моделі «Ужгород»

$H, \text{ м}$	$V_p, \text{ м/с}$	$V_s, \text{ м/с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
3	1030	775	2080
35,5	3480	2400	2490
50,2	2200	1650	2200
69,5	2310	1540	2270
76,5	2950	1967	2330
86,5	2379	1586	2290
103,2	2674	1783	2360
121,0	3080	1987	2380
149,0	3090	1994	2370
228,0	4700	3200	2600
248,0	3043	2029	2340
400,0	3080	1987	2380

За розрахованими спектральними співвідношеннями можна оцінити ступінь впливу середовища на записи сейсмічних сигналів на станціях, який буде найбільший на частотах, що відповідають отриманим резонансним максимумам і мінімумам. Ці результати необхідно також враховувати при оцінюванні параметрів можливого сейсмічного впливу на даній території.

Запропонована реалізація методу дає змогу застосовувати цей підхід для розв'язання обернених задач.

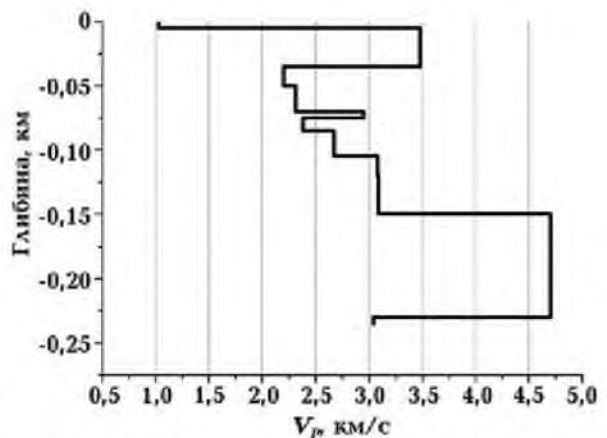


Рис. 3. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією «Ужгород».

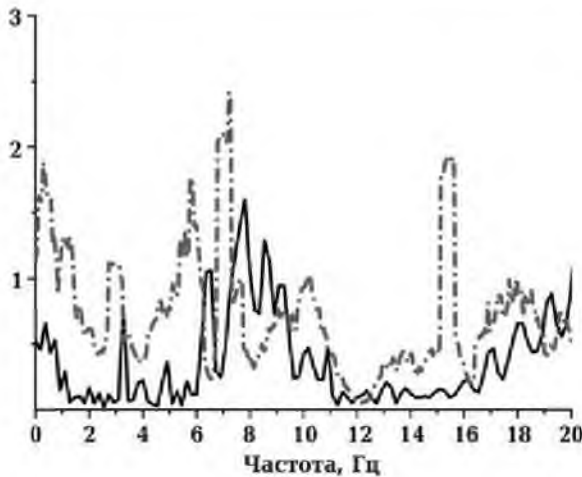


Рис. 4. Відношення спектрів коливань горизонтальної компоненти до вертикальної під сейсмічною станцією «Ужгород». Суцільна чорна лінія — відношення спектрів коливань, змодельованих методом скінчених елементів, сіра штрихова лінія — відношення зареєстрованих спектрів коливань.

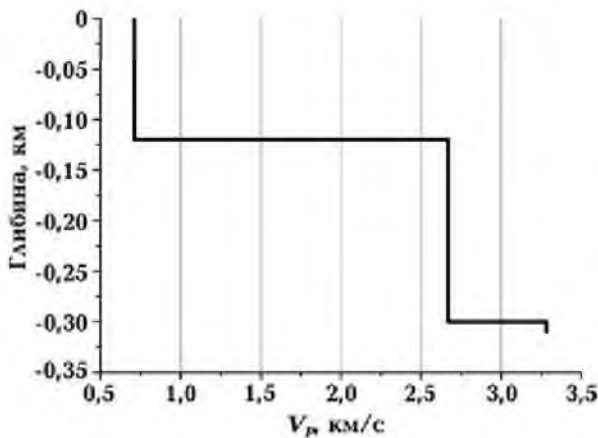


Рис. 5. Швидкісна модель середовища під сейсмічною станцією «Тросник».

**Висновки.** Наведено результати порівняння розрахунків спектральних характеристик приповерхневих шарів під сейсмічними станціями «Тросник», «Ужгород», «Міжгір'я» методом скінчених елементів та експериментальним методом. Показано їх суттєву збіжність у певних діапазонах частот і розбіжність в інших діапазонах.

Для сейсмічної станції «Міжгір'я» виявлено збіг двох інтерференційних максимумів на частоті 4 і 10 Гц для експериментального і теоретичного графіків.

Таблиця 3. Характеристики моделі «Тросник»

$H, \text{ м}$	$V_p, \text{ м/с}$	$V_s, \text{ м/с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
121	712	475	1920
305	2674	1783	2360
500	3280	2116	2420

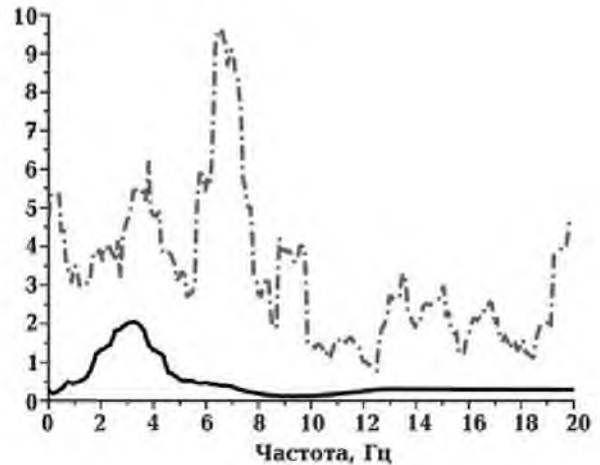


Рис. 6. Відношення спектрів коливань горизонтальної компоненти до вертикальної компоненти під сейсмічною станцією «Тросник». Суцільна чорна лінія — відношення спектрів коливань, змодельованих методом скінчених елементів, сіра штрихова лінія — відношення зареєстрованих спектрів коливань.

Для сейсмічної станції «Ужгород» графіки, отримані експериментально і за числовим методом, показали ідентичну поведінку в усьому діапазоні частот, за цими графіками виділено стабільне джерело шуму в межах міста.

Для сейсмічної станції «Тросник» виявлено розбіжність у поведінці експериментальних та модельних графіків на частоті понад 6 Гц. Такі результати пов'язані з високим рівнем ґрунтових вод під станцією, які не враховано у побудові моделі для розрахунку методом скінчених елементів.

Запропоновану методику досліджень можна застосовувати у подальших дослідженнях у сфері регіональної та інженерної сейсміки. Розбіжність у результатах



потребує подальшого аналізу та вдосконалення методів обробки, як модельного так і експериментального. Ще однією причиною неповного збігу результатів може

бути неадекватність побудованої моделі, що дає змогу використовувати дані дослідження для розв'язання обернених задач сейсміки.

### Список літератури

- Азими Ш. А., Калинина А. В., Калинин В. В., Пивоваров В. Л. Динамические и кинематические особенности импульсов распространяющихся в среде с поглощением и дисперсией фазовой скорости. *Вест. Моск. ун-та. Сер. геол.* 1967. № 1. С. 32—36.
- Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Москва: Стройиздат, 1982. 448 с.
- Брич Т. Б. Математичне моделювання впливу процесу поглиблення нафтогазової свердловини на напружено-деформований стан гірського масиву. *Вісник Львів. ун-ту. Сер. фізична.* 2010. № 45. С. 135—141.
- Вербицький С. Т., Брич Т. Б., Рожок Н. І., Купльовський Б. Є. Метод Накамури та метод скінчених елементів при дослідженні АЧХС. *Геодинаміка.* 2011. Т. 11. № 2. С. 38—40.
- Гнип А. Р. Теоретичні й експериментальні спектри H/V для середовища під сейсмічною станцією «Міжгір'я»: *Матеріали Наукової конференції-семінару «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах» (присвячена 80-річчю з дня народження Т. З. Вербицького), 29—30 травня 2012 р., м. Львів.* С. 37—40.
- Гнип А. Р. Теоретичні й експериментальні частотні характеристики приповерхневих шарів під сейсмічними станціями «Тросник», «Ужгород» і «Міжгір'я». *Геодинаміка.* 2016. Т. 20. № 1. С. 144—154.
- Гнип А. Р. Теоретичні передавальні характеристики приповерхневих шарів під сейсмічними станціями «Тросник», «Ужгород» і «Міжгір'я». *Геодинаміка.* 2015. Т. 19. № 2. С. 72—83.
- Ильющин А. А. Механика сплошной среды. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 288 с.
- Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України). *Вісник Національної академії наук України.* 2015. № 2. С. 44—57. <https://doi.org/10.15407/visn2015.02.044>.
- Кендзера О., Семенова Ю. Врахування амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі при сейсмічному мікрорайонуванні будівельного майданчика в м. Одесі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Геологія.* 2010. № 2(49). С. 10—13.
- Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород (Петрофизика). Под ред. В. Н. Дахнова. Москва: Гостоптехиздат, 1962. 490 с.
- Купльовський Б. Є. Моделювання хвильового поля для складних сейсмічних розрізів. *Вісник Львівського університету. Серія фізична.* 2010. № 45. С. 126—134.
- Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 2. Москва: Наука, 1984. 560 с.
- Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. Под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протогьяконова. Москва: Недра, 1975. 279 с.
- Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва: Наука, 1975. 576 с.
- Abercrombie, R. E. (1997). Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 731—744.
- Langston, Ch. A., Chiu, Sh. C., Lawrence, Z., Bodin, P., & Horton, S. (2009). Array Observations of Microseismic Noise and the Nature of H/V in the Mississippi Embayment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5), 2893—2911.
- Bathe, K.-J. (1982). *Finite element procedures in engineering analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Haskell, N. A. (1953). The dispersion of waves in

- multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17—34.
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2656.pdf>.
- Nakamura, Y. A. (1989). Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI, Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30(1), 25—33.
- Singiresu, S. R. (2004). *The Finite Element Method in Engineering*. Fourth edition. Miami: Elsevier Science & Technology Books.
- Starodub, G., & Gnyp, A. (1999). Models of the Earth's Crust Structure in the East Carpathian Region determined from Inversion of Farfield P-waveforms. *Acta Geophysica Polonica*, 47(4), 375—400.
- Steidl, J. H., Tumarkin, A. G., & Archuleta, R. J. (1996). What is a reference site? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1733—1748.
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89—93. <https://doi.org/10.1063/1.1699629>.
- Zhangxin, C. (2005). *Finite Element Methods and Their Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method for solid and structural mechanics*. Six edition (Vol. 1—3). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.

## Comparison of near-surface layers spectral characteristics under the seismic stations «Trosnyk», «Uzhgorod», «Mezhgirya» calculated using finite element method and obtained experimentally

*B. Ye. Kuplevskiy, T. B. Brych, 2018*

The purpose of this work was to calculate the theoretical transfer characteristics of the sedimentary layers under the seismic stations «Trosnyk», «Uzhgorod», «Mizhgirya» of the Carpathian seismic network using the Finite element method (FEM). These results are used for comparison with the dynamic parameters of near-surface layers received experimentally; for checking the conformity of investigated environment resonance properties obtained by these methods for the possibility of their application in regional seismological studies. The research was carried out by solving the direct dynamic seismic problem using the finite element method. This method of mathematical modeling allows making calculations for models that are complex in their structure. When solving the direct dynamic seismic problem using FEM, the opportunity to take into account various exchange effects inside the model does not forfeit. Also, we can calculate models with the complex geometric environment structure and various inclusions. Using the developed technique of wave field simulation by finite element method, oscillations for models of the seismic section under the «Trosnyk», «Uzhgorod» and «Mizhgirya» stations were investigated. According to the simulation results, theoretical spectral ratios for these stations were calculated. For the Seismic Station «Mizhgirya», we observe the coincidence of two interference maxima at a frequency of 4 and 10 Hz for both charts: experimental and theoretical. For the Seismic Station «Uzhgorod», the graphs obtained by the experimental and modeling method showed identical behavior throughout the frequency range. These charts provide a stable source of noise within the city. For the Seismic Station «Trosnyk» there is a discrepancy in the behavior of experimental and model charts above 6 Hz. Such results are due to the high level of groundwater under the seismic station, which was not taken into account in the creation of the model for calculating using the finite element method.

The spectral characteristics of near-surface layers under the «Trosnyk», «Uzhgorod» and «Mizhgyrya» seismic stations were calculated by the finite element method for the first time. The results of mathematical modeling were compared with experimental measurements. The knowledge about the dynamic parameters of the upper sediment layers under seismic stations, which are the largest filter of oscillation frequencies in the spectral range, will allow more accurate interpretation of registered by these stations occurrences. The calculated spectral ratios give a possibility to estimate the degree of environmental influence on stations' seismic signals recording, which will be the largest at frequencies corresponding to the received resonance maxima and minima. These results should be taken into account when evaluating the parameters of possible seismic effects in the territory.

**Key words:** modeling, finite element method, transfer characteristic, Nakamura's technique, resonance frequency, interference.

### References

- Azimi, Sh. A., Kalinina, A. V., Kalinin, V. V., & Pivovarov, V. L. (1967). Dynamic and kinematic features of pulses propagating in a medium with absorption and dispersion of the phase velocity. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya geologicheskaya*, (1), 32—36 (in Russian).
- Bate, K., & Wilson, E. (1982). *Numerical analysis methods and finite element method*. Moscow: Stroyizdat (in Russian).
- Brych, T. B. (2010). Mathematical modeling of the influence of deepening of oil and gas well on rock stress-strain state. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya fizychna*, (45), 135—141 (in Ukrainian).
- Verbitskiy, S. T., Rozhok, N., Brych, T. B., & Kuplovskyy, B. Ye. (2011). Nakamura's technique and finite element method in solid amplitude-frequency response investigation. *Geodynamika*, 11(2), 38—40 (in Ukrainian).
- Gnyр, A. G. (2012). Theoretical and experimental H/V spectra for the environment under the seismic station «Mizhgyrya»: *Proceedings of the scientific conference «Seismological and geophysical studies in seismically active regions» (dedicated to the 80th anniversary of the birth of T. S. Verbitskiy), May 29—30, 2012, Lviv* (pp. 37—40) (in Ukrainian).
- Gnyр, A. R. (2016). Synthetic and experimental frequency characteristics of near-surface layers under the seismic stations Trosnyk, Uzhgorod, and Mizhgyrya. *Geodynamika*, 20(1), 144—154. <https://doi.org/10.23939/jgd2016.01.144> (in Ukrainian).
- Gnyр, A. R. (2015). Synthetic frequency characteristics of near-surface layers under the seismic stations Trosnyk, Uzhgorod, and Mezhygoria. *Geodynamika*, 19(2), 72—83. <https://doi.org/10.23939/jgd2015.02.072> (in Ukrainian).
- Ilyushin, A. A. (1978). *Mechanics of continuum*. Moscow: Moscow University Press (in Russian).
- Kendzera, O. V. (2015). Seismic hazard assessment and protection against earthquakes (practical applications of developments of Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine). *Visnyk Natsionalnoi akademiyi nauk Ukrainy*, (2), 44—57. <https://doi.org/10.15407/vsn2015.02.044> (in Ukrainian).
- Kendzera, O., & Semenova, Yu. (2010). Allowing for amplitude-frequency characteristics of the ground layer at the seismic risk microzoning of building site in Odessa. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Seriya Heolohiya*, (2), 10—13 (in Ukrainian).
- Kobranova, V. N. (1962). *Physical properties of rocks (Petrophysics)*. V. N. Dakhnov (Ed.). Moscow: Gostoptekhizdat (in Russian).
- Kuplovskyy, B. Ye. (2010). Design of wave field for complicated arranged seismic cuts. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya fizychna*, (45), 126—134 (in Ukrainian).
- Sedov, L. I. (1984). *Mechanics of continuum* (Vol. 2). Moscow: Nauka (in Russian).
- Melnikov, N. V., Rzhhevskiy, V. V., & Protodyakonov, M. M. (Eds.). (1975). *Reference book (cadastre) of physical properties of rocks*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Timoshenko, S. P., & Gudier, J. (1975). *The Theory of Elasticity*. Moscow: Nauka (in Russian).



- Abercrombie, R. E. (1997). Near-surface attenuation and site effects from comparison of surface and deep borehole recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 731—744.
- Bathe, K.-J. (1982). *Finite element procedures in engineering analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Haskell, N. A. (1953). The dispersion of waves in multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17—34.
- Hutton, D. V. (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Langston, Ch. A., Chiu, Sh. C., Lawrence, Z., Bodin, P., & Horton, S. (2009). Array Observations of Microseismic Noise and the Nature of H/V in the Mississippi Embayment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5), 2893—2911.
- Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications. <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2656.pdf>.
- Nakamura, Y. A. (1989). Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI, Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30(1), 25—33.
- Singiresu, S. R. (2004). *The Finite Element Method in Engineering*. Fourth edition. Miami: Elsevier Science & Technology Books.
- Starodub, G., & Gnyp, A. (1999). Models of the Earth's Crust Structure in the East Carpathian Region determined from Inversion of Farfield P-waveforms. *Acta Geophysica Polonica*, 47(4), 375—400.
- Steidl, J. H., Tumarkin, A. G., & Archuleta, R. J. (1996). What is a reference site? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1733—1748.
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89—93. <https://doi.org/10.1063/1.1699629>.
- Zhangxin, C. (2005). *Finite Element Methods and Their Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method for solid and structural mechanics*. Six edition (Vol. 1—3). Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.