

**РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ АЗИМУТАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ  $q_i$  ДЛЯ ЗАКАРПАТСЬКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РЕГІОНУ**

У представленій статті обґрунтовано введення азимутального коефіцієнта  $q_i$  для застосування у навчаючій вибірці нейронної мережі, як параметру, що відповідає за напрямок поширення хвилі в реальному середовищі. Обчислені середні значення азимутального коефіцієнта  $q_i$  для відповідних секторів із близькими значеннями  $q_i$  для одно, дво та три-шаруватого середовища. На прикладах показано використання азимутального коефіцієнта  $q_i$  для аналізу параметрів середовища.

**Ключові слова:** закарпатський сейсмоактивний регіон; азимутальний коефіцієнт  $q_i$ ; навчаюча вибірка нейронної мережі; середня швидкість поширення хвилі в шарі; глибина залягання джерела землетрусу.

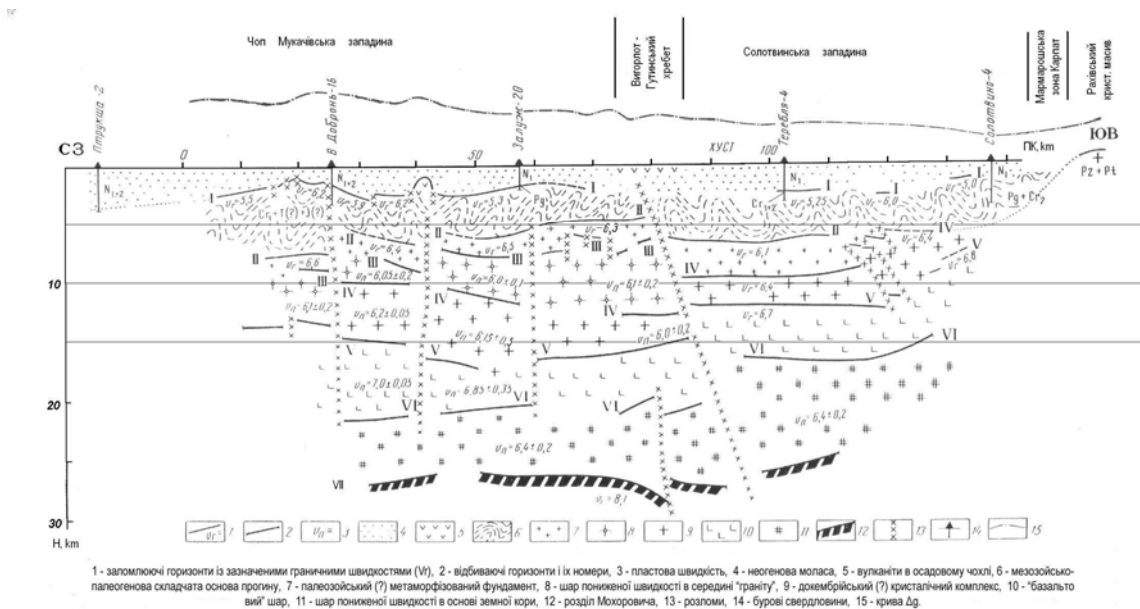
**Вступ**

Метод розрахунку глибини залягання джерела землетрусу, що зареєстрований 4-ма та більшою кількістю сейсмічних станцій, є відомим і не потребує опису. Але з різних технічних причин не завжди вдається зафіксувати землетрус необхідною кількістю сейсмічних станцій. Можливість розрахунку глибини залягання джерела землетрусу, що зареєстрований 3-ма станціями, надає використання статистичного аналізу. Представлена робота є лише першим кроком до розв'язання задачі розрахунку та уточнення глибини залягання джерел місцевих землетрусів Закарпатського сейсмоактивного регіону. У даній статті показано результати розрахунків для одно, дво та три-шаруватого середовища, для яких відомі глибини залягання вогнищ землетрусів (глибина 1000-9000м.), що повністю охоплюють глибини місцевих землетрусів.

**Об'єкт дослідження**

Одним з інструментів статистичного аналізу є використання мереж штучних нейронів. Щоб отримати якісний результат, необхідно надати нейронній мережі достатню кількість прикладів та відповідних їм розв'язків для навчання, тобто встановлення та запам'ятовування закономірностей, що пов'язують їх між собою. Такими прикладами слугували дані зареєстрованих в районі Закарпаття землетрусів, які описано в сейсмологічних бюлетенях за 2002 – 2011 роки [Сейсмологіческий бюллетень Украины, 2002-2011]. Використавши дані сейсмо-геологічного розрізу земної кори вздовж Закарпатського прогину (рис.1) [Чекунув та ін., 1969], було змодельоване середовище, яке використовується для роботи.

Працюючи з реальним, анізотропним середовищем, та аналізуючи поведінку поширення сейсміч-



**Рис. 1.** Сейсмо-геологічний розріз земної кори вздовж Закарпатського прогину

них хвиль в різних напрямках, дійшли висновку про необхідність введення додаткового параметру для нейронної мережі, який би відповідав за зміну швидкості поширення хвилі з різних напрямків (різні пари епіцентр-сейсмостанція(E-S)). У роботі

[Lin and others, 2010] американські науковці використовують моделі, в яких швидкості поширення сейсмічних хвиль залежні від азимуту, а канадські [Perry and others, 2002] працюють з моделями типу LITH5.0, де використовують зміну

швидкостей на сітці  $5^\circ \times 5^\circ$  завдяки великій кількості сейсмостанцій та зареєстрованих ними даних. У зв'язку з обмеженою кількістю сейсмостанцій ми змушені шукати інший підхід. Так як математично прив'язати азимут, як компоненту навчаючої вибірки прикладів для мережі штучних нейронів неможливо, введено інший параметр, що відповідає за напрямок поширення хвилі – азимутальний коефіцієнт  $q_i$ .

Представлені розрахунки зроблено для  $P$ -хвилі (аналогічні розрахунки можна зробити і для  $S$ -хвилі).

Для одного шару задача проста і на ній не варто зупинятись.

Розглянемо задачу знаходження точки перетину  $P$ -хвилею границі першого шару для двошарового середовища. Маючи епіцентрально відстань  $\varepsilon$ , потужність першого шару  $h_1$ , відстань до джерела в другому шарі  $h_2$ , швидкості поширення  $P$ -хвилі в першому та другому шарі  $v_1$  та  $v_2$  відповідно, реальний час приходу хвилі  $t_r$ , знаходимо величину  $x$  (рис. 2).

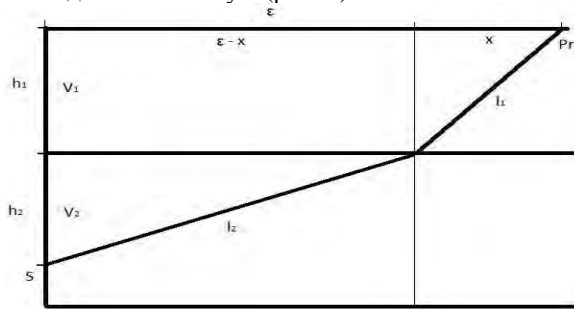


Рис.2. Проходження хвилі у двох шарах.

Для цього проведемо наступні математичні операції:

$$t = t_1 + t_2, \quad t_1 = \frac{l_1}{v_1}, \quad t_2 = \frac{l_2}{v_2}, \quad l_1 = \sqrt{x^2 + h_1^2},$$

$$l_2 = \sqrt{(\varepsilon - x)^2 + h_2^2} \quad (1)$$

де  $t_1, t_2$  – часи проходження  $P$ -хвилі в 1-му та 2-му шарах,  $l_1, l_2$  – шляхи проходження  $P$ -хвилі в 1-му та 2-му шарах.

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + h_1^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(\varepsilon - x)^2 + h_2^2}}{v_2} \quad (2)$$

$$Bx^4 - Cx^3 + Dx^2 + Ix + E = 0 \quad (3)$$

де  $A = \varepsilon^2 + h_1^2 + h_2^2, \quad B = \frac{v_1^4 - 2v_1^2 v_2^2 + v_2^4}{v_1^4 v_2^4},$

$$C = \frac{4\varepsilon}{v_2^2} \left( \frac{v_1^2 + v_2^2}{v_1^2 v_2^2} \right),$$

$$D = \frac{6\varepsilon^2 + 2h_2^2}{v_2^4} - \frac{2A}{v_1^2 v_2^2} - 2t^2 \frac{v_1^2 + v_2^2}{v_1^2 v_2^2} + \frac{2h_1^2}{v_1^4},$$

$$I = \frac{4t_r^2 \varepsilon}{v_2^2} - \frac{4\varepsilon^3 + 4\varepsilon h_2^2}{v_2^4} + \frac{4\varepsilon h_1^2}{v_1^2 v_2^2}, \quad (4)$$

$$E = \left( \frac{\varepsilon^2 + h_2^2}{v_2^2} - \frac{h_1^2}{v_1^2} \right) - 2t_r^2 \frac{v_2^2 h_1^2 + v_1^2 (\varepsilon^2 + h_1^2)}{v_1^2 v_2^2} + t_r^4$$

Отримавши час  $t_c$  вступу прямої хвилі згідно (2) і  $t_r$  (реальний час взятий із бюлетеня), знаходимо азимутальний коефіцієнт  $q_i$ , величина якого змінюється із зміною азимуту:

$$q_i = \frac{t_c}{t_r} \quad (5)$$

де  $i=1$  (для першого шару) та  $i=2$  (для двох шарів). Отже,

$$v_{ai} = v_i q_i \quad (6)$$

$v_{ai}$  – середня швидкість поширення хвилі в шарі (усереднена для кожного сектору).

Слід зазначити, що середня глибина шару  $h_1$ , середня швидкість шарів  $v_1$  та  $v_2$  обчислювались для кожної пари E-S, використовуючи значення глибин і швидкостей (рис. 1).

Для подальших досліджень розглянуто варіант, у якому за основу беремо область сейсмічних подій і виділяємо сектори до сейсмостанцій (рис. 4).

Якщо рахувати  $x$  для трьох шарів аналогічним методом, отримаємо рівняння 28-го степеня, що зробить досить важким вибір потрібного розв'язку та приведе до суттєвого збільшення похибки. Тому було використано так званий метод “китайської вежі”, який полягає в об'єднанні шарів.

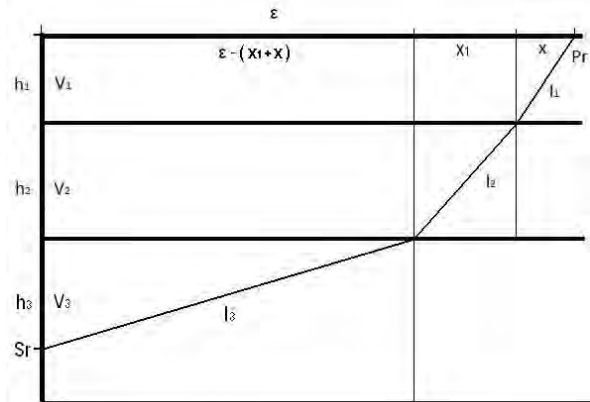


Рис. 3. Проходження хвилі у трьох шарах.

Таким чином, можна розглядати перший і другий шари як один із ефективною швидкістю проходження хвилі  $v_{2a}^*$  та далі розв'язувати задачу для двох шарів.

$$S = \sqrt{\varepsilon^2 + (h_1 + h_2)^2} \quad (7)$$

$$v_{2a}^* = \frac{S}{t} \quad (8)$$

Аналізуючи зміну величини азимутального коефіцієнта анізотропії  $q_i$  у виділених секторах, можна робити наступні висновки, щодо середовища:

1) у секторі Тячів, Терεбля, Угль – NSL, BRI, MUK, UZH (рис. 5) азимутальний коефіцієнт першого шару  $q_1=1,4877$ , а в тому ж секторі від Терεсви  $q_1=0,9732$  при  $q_2=1,143$  для обох випадків, що дає можливість зробити висновок про знаходження між Терεсвою та Тячевом-Терεблею у першому шарі аномалії, що має швидкість більшу швидкості першого шару;

2) у секторі Дубове, Теребля, Угля, Королево, Тросник, Берегове – KOR, TRS, BER (рис.5), біля Королево та Берегове в першому шарі знаходяться області з великою пластичністю ( $q_1 > 2$ );

3) у секторі Берегове, Тросник, Королево, Хуст-TRS, KOR, NSL для пари Хуст-NSL,  $q_2$  зростає з глибиною ( $h=4000 - q_2=1,0893$ ,  $h=4700 - q_2=1,1270$ ,  $h=6000 - q_2=1,2384$ ), що свідчить про ущільнення породи, а для пари Хуст-TRS ( $h=4000 - q_2=1,2961$ ,  $h=4700 - q_2=1,0740$ ,  $h=6000 - q_2=1,0210$ ), навпаки – наявність завади, пластичність якої зростає з глибиною;

4) у секторі Свалява-BRI, KOR  $q_2= 1,001, 0,95201, 1,17692, 1,05068, 1,03351$ , пара у Мукачеве-NSL,  $q_1=1,5173, 1,5353, 1,8363, 1,5370, 1,4801$ , спостерігаємо "випадання" в обох випадках величини азимутального коефіцієнта із загальної картини через можливі помилки в даних бюлетеня, що потребує додаткового дослідження.

### Висновки

Таким чином, у запропонованій роботі введено азимутальний коефіцієнт  $q_i$  для застосування у навчаючій вибірці нейронної мережі як параметра, що відповідає за напрямок поширення хвилі в реальному середовищі для Закарпатського сейсмоактивного регіону.

Обчислено середні значення  $q_i$  для відповідних секторів із близькими значеннями  $q_i$  для одного, двох та трьох шарів та здійснено його використання для аналізу параметрів середовища. Із збільшенням кількості опрацьованих даних сейсмічних бюлетенів, будуть уточнюватись і середні значення коефіцієнтів  $q_i$  для всіх секторів. Отримані результати будуть використані для визначення, наприклад, глибини залягання вогнища землетрусу, використовуючи нейронно-мережеве моделювання.

## РАСЧЕТ И АНАЛИЗ АЗИМУТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ $q_i$ ДЛЯ ЗАКАРПАТСКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РЕГИОНА

Э.М. Козловский, Д.В. Малицкий, А.Ю. Павлова

В представленной статье обосновано введение азимутального коэффициента  $q_i$  для использования в обучающей выборке нейронной сети, как параметра отвечающего за направление распространения волны в реальной среде. Рассчитаны средние значения азимутального коэффициента для соответственных секторов с близкими значениями  $q_i$  для одно и дво- и трех-слоистой среды. На примерах продемонстрировано использование азимутального коэффициента для анализа параметров среды.

**Ключевые слова:** закарпатский сейсмоактивный регион, азимутальный коэффициент  $q_i$ , обучающая выборка нейронной сети, средняя скорость распространения волны в слое, глубина залегания источника землетрясения.

## DETERMINING AND ANALYSIS OF AZIMUTHAL COEFFICIENTS $q_i$ FOR THE SEISMICALLY ACTIVE REGION OF TRANSCARPATHIANS

E.M. Kozlovskyy, D.V. Malyckyy, A.Yu. Pavlova

In the article, the implementation of azimuthal coefficient  $q_i$  is justified, which is used in learning sample of neural network as a parameter accounting for the direction of wave propagation in real media. The average values of azimuthal coefficient  $q_i$  have been determined for the respective sectors with its similar values for a single, two- and three-layered medium. The application of azimuthal coefficient in the analysis of parameters of the medium has been demonstrated.

**Keywords:** Transcarpathian seismically active region, azimuthal coefficient  $q_i$ , learning sample of neural network, average velocity of wave propagation in the layer, depth of earthquake source.

Робота виконана за підтримки проекту УНТЦ № 5726.



Рис. 4. Виділення секторів, в які входять області сейсмічних подій з близькими значеннями азимутальних коефіцієнтів  $q_i$ .

### Література

- Сейсмологический бюллетень Украины за 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 гг. – Севастополь: НПЦ „ЭКОСИ-Гидрофизика”.
- Чекунов А.В., Ливанова Л.П., Гейко В.С. Глубинное строение земной коры и некоторые особенности тектоники Закарпатского прогиба. // Сов. геология. – 1969. – С. 57-69.
- Lin F., Ritzwoller M., Yang Y., Moschetti M., Fouch M. The stratification of seismic azimuthal anisotropy in the western US // American Geophysical Union. Fall Meeting 2010.
- Perry H., Eaton D., Forte A. LITH5.0: a revised crustal model for Canada based on Lithoprobe results // Geophys. J. Int. – 2002. – № 150, – P. 285-294.