

УДК 550.344

Е. Козловський, пров. інж.,
Д. Малицький, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua,
А. Павлова, асп. проф.,
Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна
Національної Академії Наук України,
вул. Наукова, 3-б, м. Львів, Україна, 79060

РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ АЗИМУТАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ Q , ТА УТОЧНЕННЯ ШВИДКІСНОЇ МОДЕЛІ ЗАКАРПАТСЬКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РЕГІОНУ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Метою представленої роботи є уточнення швидкісної моделі Закарпатського сейсмоактивного регіону для подальшого її використання у нейронно-мережевому моделюванні для розв'язання задачі розрахунку та уточнення глибини залягання джерел місцевих землетрусів. Проведено аналіз поведінки поширення сейсмічних хвиль в різних напрямках Закарпатського сейсмоактивного регіону. Обґрунтовано введення азимутального коефіцієнта q_i для застосування у навчачій вибірці нейронної мережі, як параметру, що відповідає за напрямок поширення хвилі в реальному середовищі. Показано два способи виділення секторів коли за основу взято або сейсмостанцію, або область сейсмічних подій. Обчислені середні значення азимутального коефіцієнта q_i для відповідних секторів із близькими значеннями q_i для одно-, дво- та три-шаруватого середовища у відповідності до глибини розташування вогнища землетрусу в першому, другому або в третьому шарі. Оскільки три-шарувате середовище охоплює глибини знаходження джерел землетрусів до 8000–9000 м, то проведені розрахунки повністю відображають місцеві сейсмічні події Карпатського регіону. Розрахунок середніх потужностей шарів h та середніх швидкостей шарів v обчислювались окремо для кожної пари E-S (епіцентр-сейсмостанція). Для розрахунку азимутального коефіцієнта q_i третього шару використано метод умовного об'єднання шарів. Представлено розрахунки, які виконані для прямої P-хвилі (аналогічні розрахунки можна зробити і для S-хвилі). Обчислена відносна похибка розрахунку середнього значення азимутального коефіцієнта q_i для кожного сектору, який проведено на основі 4 – 26 подій для відповідних секторів в залежності від наявної кількості даних про події, які вибрано із сейсмологічних бюлетенів. Проведено інтерпретацію отриманих результатів та розглянуто варіанти використання даної методики. На прикладах показано використання азимутального коефіцієнта q_i для аналізу параметрів середовища.

Ключові слова: Закарпатський сейсмоактивний регіон; азимутальний коефіцієнт q_i ; навчача вибірка нейронної мережі; середня швидкість поширення хвилі в шарі; глибина розташування джерела землетрусу; прямі P та S-хвилі; пари E-S (епіцентр-сейсмостанція); умовна швидкість проходження хвилею об'єднаних шарів.

Вступ. Метод визначення координат епіцентру та 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 і, відповідно, розрахувати глибину залягання джерела сейсмічної події. Проте, таку можливість може надати застосування іншого підходу, а саме, використання статистичного аналізу для розрахунку глибини залягання джерела землетрусу.

Представлена робота є лише першим кроком розв'язання задачі розрахунку та уточнення глибини залягання джерел місцевих землетрусів Закарпатського сейсмоактивного регіону. У даній статті показані результати розрахунків для одно-, дво- та три-шарового середовища (глибина до 8000–9000 м), для яких відомі глибини залягання вогнищ землетрусів, що повністю охоплюють місцеві сейсмічні події Карпатського регіону.

Одним з інструментів статистичного аналізу є мережі штучних нейронів. Для того, щоб отримати якісний

результат нейронно-мережевого моделювання, необхідно розглянути достатню кількість прикладів та відповідних їм розв'язків для навчання нейронної мережі, тобто встановлення та запам'ятовування закономірностей, що пов'язують їх між собою. Такими прикладами слугували дані землетрусів, що зареєстровано в районі

Закарпаття, які описано в сейсмологічних бюлетенях за 2002–2011 рр [1]. Модель середовища, яку надалі використано для роботи, побудована на основі даних сейсмо-геологічного розрізу земної кори вздовж Закарпатського прогину (рис. 1) [2].

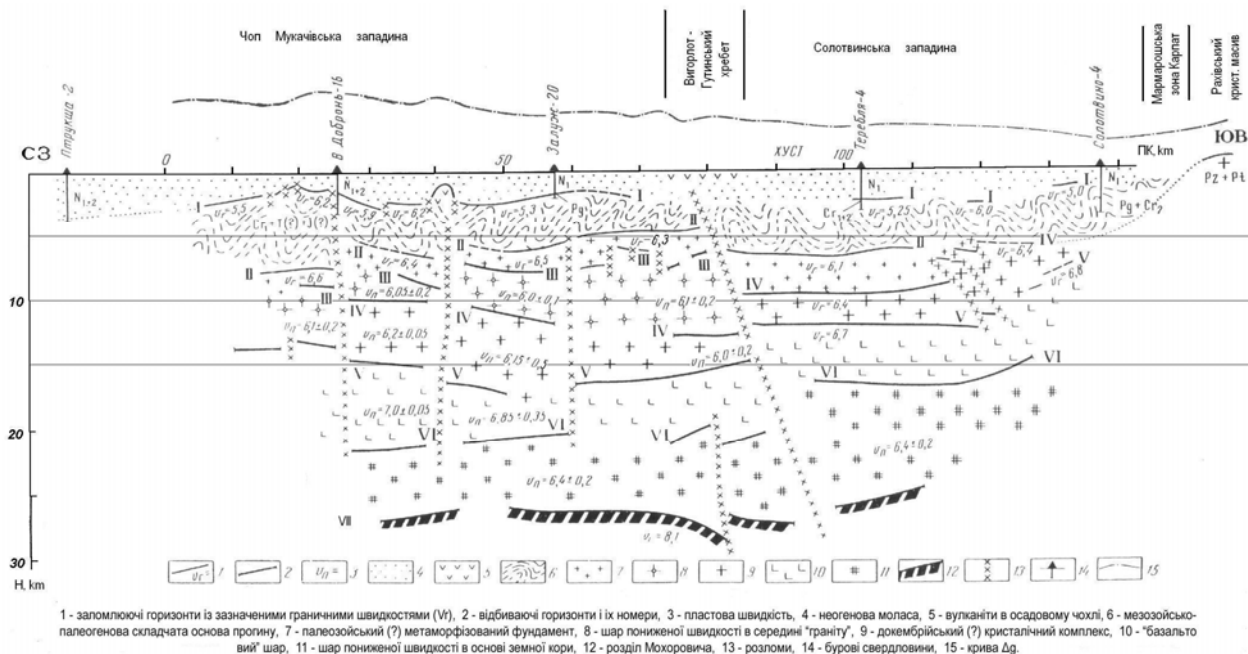


Рис. 1. Сейсмо-геологічний розріз земної кори вздовж Закарпатського прогину

Викладення основного матеріалу. Працюючи з реальним, неоднорідним середовищем Закарпатського сейсмоактивного регіону, та аналізуючи поведінку поширення сейсмічних 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 еліпсентр-сейсмостанція (E-S)). У роботі F.C. Lin [3] американськими науковцями використано моделі, в яких швидкості поширення сейсмічних хвиль залежні від азимуту, а в статті H.K.C. Perry [4] описано роботу канадських сейсмологів, які працюють з моделями типу LITH5.0, де використано зміну швидкостей і інших параметрів на сітці $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ та в середині кожної такої клітинки, завдяки великій кількості сейсмічних станцій та зареєстрованих ними сейсмічних подій. У зв'язку з обмеженою кількістю сейсмостанцій, що є характерним для Закарпаття, слід шукати інший підхід. Так як швидкості поширення сейсмічних хвиль в різних напрямках суттєво відрізняються і математично прив'язати азимут, як компоненту навчаючої вибірки прикладів для мережі штучних нейронів є неможливим, то було введено інший параметр, що відповідає за напрямок поширення хвилі – азимутальний коефіцієнт q_i .

Перейдемо до визначення параметра q_i із врахуванням різних глибин залягання вогнища землетрусу, тобто розміщення джерела в першому, другому або в третьому шарі.

У даній роботі представлено розрахунки, які викона-
ні для прямої P -хвилі (аналогічні розрахунки можна
зробити і для S -хвилі).

Розглянемо випадок, коли джерело сейсмічних хвиль розташоване в першому шарі (рис. 2). Вважаємо шляхи проходження хвилі в реальному та модельованому середовищах рівними.

Згідно з рис. 2 отримано співвідношення:

$$S = \sqrt{\varepsilon^2 + h_1^2}, \quad t_{c1} = S/v_1, \quad t_{c1}/t_r = q_1, \quad v_{a1} = v_1 q_1, \quad (1)$$

де h_1 – потужність першого шару, v_1 – швидкість в 1-му шарі (взята із сейсмо-геологічного розрізу (рис. 1), ε – епіцентрально відстань, t_r – час проходження хвилі (взятий із бюлетеня), t_{c1} – розрахований час, q_1 – азимутальний коефіцієнт, v_{a1} – уточнена швидкість для першого шару.

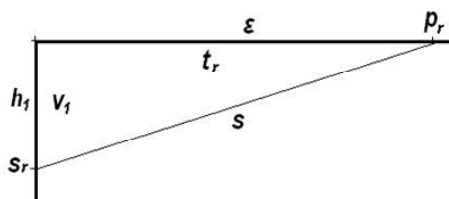


Рис. 2. Проходження прямої P -хвилі від джерела Sr , яке розміщене в першому шарі

Таким чином, отримано азимутальний коефіцієнт q_1 та уточнену швидкість v_{a1} для першого шару згідно (1).

Наступним кроком є отримання азимутального коефіцієнта, коли джерело розміщене в другому шарі. Розглянемо задачу знаходження точки перетину P -хвилею границі між першим та другим шаром для двошарового середовища (рис. 3). Маючи епіцентрально відстань ϵ , потужність першого шару h_1 , відстань до джерела в другому шарі h_2 , швидкості поширення P -хвилі в першому та другому шарі v_{a1} (уточнена швидкість для першого шару) та v_2 (швидкість взята із сейсмогеологічного розрізу (рис. 1)), а також час приходу хвилі t_r (згідно бюлетеня), знаходимо величину x (рис. 3).

Для цього проведемо математичні операції:

$$\begin{aligned} t &= t_1 + t_2, \quad t_1 = \frac{l_1}{v_{a1}}, \quad t_2 = \frac{l_2}{v_2}, \\ l_1 &= \sqrt{x^2 + h_1^2}, \quad l_2 = \sqrt{(\varepsilon - x)^2 + h_2^2} \end{aligned} \quad (2)$$

де t_1, t_2 – часи проходження P -хвилі в 1-му та 2-му шарах, h_1, h_2 – шляхи проходження P -хвилі в 1-му та 2-му шарах.

$$t_{c2} = \frac{\sqrt{x^2 + h_1^2}}{V_{a1}} + \frac{\sqrt{(\varepsilon - x)^2 + h_2^2}}{V_2} \quad (3)$$

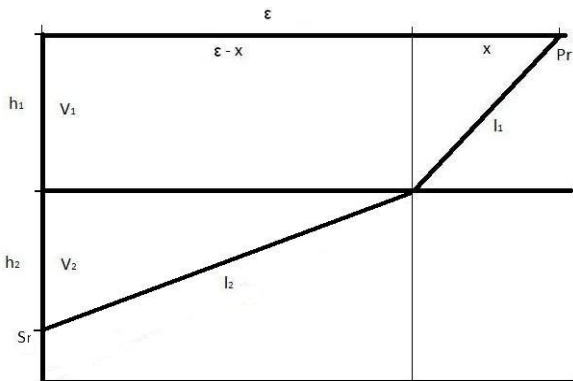


Рис. 3. Проходження прямої P -хвилі від джерела S_r , яке розміщене в другому шарі

Отримуємо рівняння

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

$$\text{де } A = \varepsilon^2 + h_1^2 + h_2^2, \quad B = \frac{V_{a1}^4 - 2V_{a1}^2V_2^2 + V_2^4}{V_{a1}^4V_2^4}, \quad C = \frac{4\varepsilon}{V_2^2} \left(\frac{V_{a1}^2 + V_2^2}{V_{a1}^2V_2^2} \right),$$

$$D = \frac{6\varepsilon^2 + 2h_2^2}{V_2^2} - \frac{2A}{V_{a1}^2V_2^2} - 2t^2 \frac{V_{a1}^2 + V_2^2}{V_{a1}^2V_2^2} + \frac{2h_1^2}{V_{a1}^2},$$

$$I = \frac{4t^2\varepsilon}{V_2^2} - \frac{4\varepsilon^3 + 4\varepsilon h_2^2}{V_2^4} + \frac{4\varepsilon h_1^2}{V_{a1}^2V_2^2},$$

$$E = \left(\frac{\varepsilon^2 + h_2^2}{V_2^2} - \frac{h_1^2}{V_{a1}^2} \right) - 2t_r^2 \frac{V_2^2h_1^2 + V_{a1}^2(\varepsilon^2 + h_1^2)}{V_{a1}^2V_2^2} + t_r^4 \quad (5)$$

Таким чином, отримано час проходження хвилі в другому шарі t_{r2} та розрахований час проходження хвилі в цьому ж шарі t_{c2} (згідно сейсмо-геологічного розрізу) і знайдено азимутальний коефіцієнт q_2 та уточнену швидкість v_{a2} проходження хвилі в другому шарі.

$$q_2 = \frac{t_{c2}}{t_{r2}}, \quad v_{a2} = v_2 q_2 \quad (6)$$

Слід зазначити, що середня потужність шару h_1 , середні швидкості шарів v_1 та v_2 обчислювались для кожної пари E - S (епіцентр-сейсмостанція), використовуючи значення глибин і швидкостей із сейсмо-геологічного розрізу (рис. 1).

Наступним кроком є інтерпретації отриманих результатів. Розглянуто два варіанти, які використано в даній методиці. У першому варіанті за основу беремо станцію та виділяємо сектори до скупчення епіцентрів сейсмічних подій (нанесених на карту Закарпатської області), які зафіксовано за період з 2002 по 2011 р (рис. 4). Такі рисунки можна зробити для кожної сейсмостанції. Цей варіант є цікавий сейсмологам для аналізу параметрів середовища навколо кожної із сейсмостанцій. Блакитним кольором показано скупчення епіцентрів сейсмічних подій. Стрілка вказує на напрямки E - S . Сектори з близькими значеннями q_i показані однаковим кольором. Над стрілкою (чорним кольором) вказано середнє значення азимутального коефіцієнта першого шару q_1 для даного сектору, під стрілкою (синім кольором) – середнє значення q_2 для другого шару. Відносна похибка розрахунку середнього значення азимутального коефіцієнта q_i для одного сектору змінюється в межах від 0,5% до 6% для різних секторів. Розрахунок середнього значення q_i проведено на основі 4-26 подій для кожного сектора в залежності від наявності кількості даних про події, які вибрано із сейсмологічних бюлетенів.

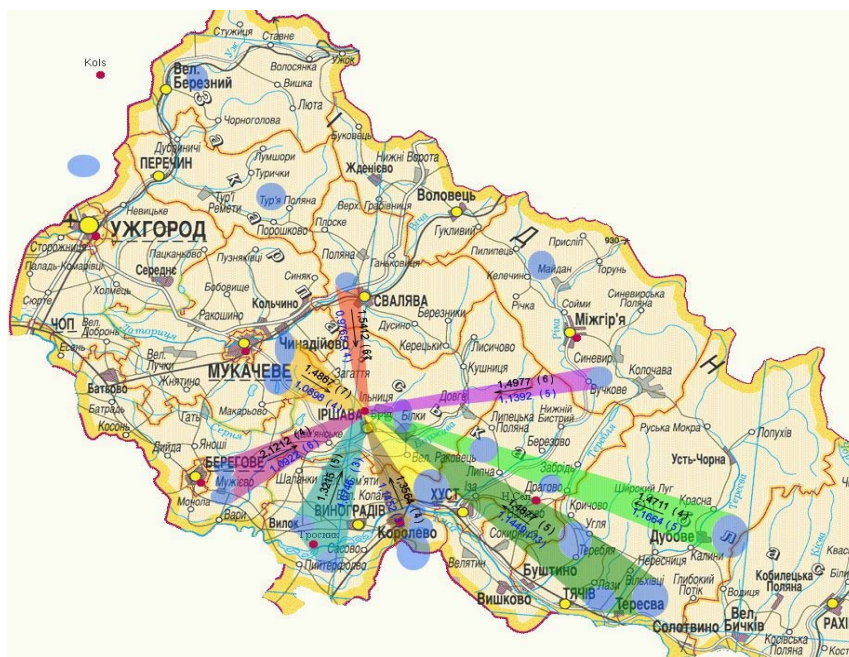


Рис. 4. Спосіб виділення секторів: за основу взято станцію та виділено сектори до скупчення епіцентрів сейсмічних подій

У другому варіанті за основу беремо область сейсмічних подій і виділяємо сектори до сейсмостанцій, як показано на рис. 5.

Для подальших досліджень розглянуто другий варіант, так як необхідно виділити сектори, які охоплюють області сейсмічних подій із близькими значеннями ази-

мутальних коефіцієнтів q_i , а також станції, що реєструють ці події (рис. 8).

Наприклад, виділяємо сектор, що охоплює області сейсмічних подій біля Тересви, Тячева, Терембі, Углі, Хуста, Мукачєвого та відповідні станції реєстрації: NSL, BRI, MUKU, UZH.



Рис. 5. Спосіб виділення секторів: за основу взято область сейсмічних подій і виділено сектори до сейсмостанцій

Наступний крок – джерело розміщене в третьому шарі. Для цього випадку приведено наступні міркування. Розраховуючи значення x згідно (4) для двох шарів, отримано рівняння полінома 4-го степеня. Якщо рахувати x для трьох шарів аналогічним методом ми отримаємо рівняння 28-го степеня, що зробить досить важким вибір потрібного розв'язку рівняння та приведе до суттєвого збільшення похибки. Тому був використаний, так званий, метод "китайської вежі" – умовне об'єднання першого та другого шарів.

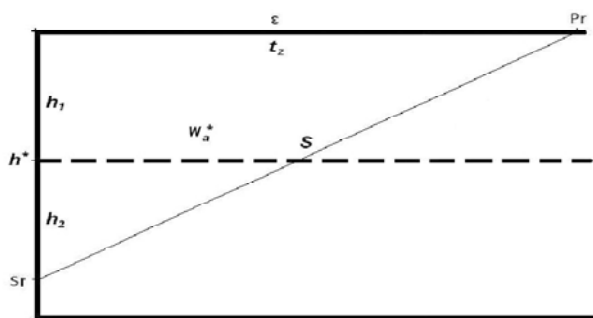


Рис. 6. Модель середовища, коли використано умовне об'єднання першого та другого шарів

Для обчислення умовної швидкості проходження хвилею об'єднаних 1-го та 2-го шарів зробимо наступні розрахунки:

$$h^* = h_1 + h_2, \quad S = \sqrt{\varepsilon^2 + h^{*2}}, \quad w_a^* = S/t_z, \quad (7)$$

де w_a^* – умовна швидкість проходження хвилею об'єднаних 1-го та 2-го шарів.

Таким чином, можна розглядати перший і другий шари як один із умовною швидкістю проходження хвилі w_a^* та далі розв'язувати задачу для двох шарів (рис. 7).

Отже, у рівняннях (5) замінюємо величини h_1, l_1, v_1, l_2, h_2 , як показано у (8) та отримуємо розв'язки рівняння (4) для задачі три-шарового середовища.

$$h_1 \rightarrow h^*, \quad l_1 \rightarrow L^*, \quad v_1 \rightarrow w_a^*, \quad l_2 \rightarrow L_3, \quad h_2 \rightarrow h_3 \quad (8)$$

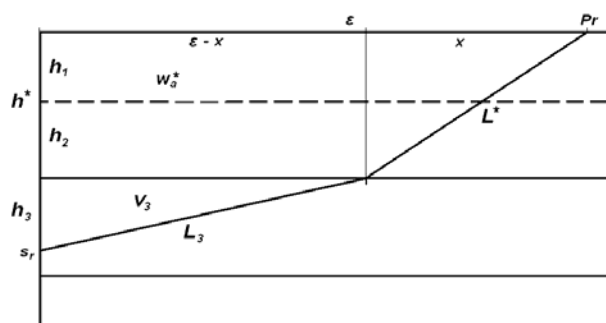


Рис. 7. Проходження прямої P-хвилі від джерела S_r , яке розміщене в третьому шарі з використанням методу "китайської вежі"

Таким чином, для різних моделей середовища у залежності від глибини залягання вогнища землетрусу побудовано методику визначення азимутальних коефіцієнтів q_i у випадку розміщення джерела в першому, другому або третьому шарі. Отримані результати продемонстровано на рис. 8.

Аналізуючи величину азимутального коефіцієнта q_i , можна зробити наступні висновки:

1. у секторі Тячів, Теремля, Угря – NSL, BRI, MUK, UZH (рис. 8) азимутальний коефіцієнт першого шару $q_1=1,4877$, а в тому ж секторі від Тересви параметр $q_1=0,9732$ при $q_2=1,063$ для обох випадків. Отже, між Тересвою та Тячевом-Тереблею у першому шарі можлива аномалія, швидкість якої більша швидкості першого шару;

2. у секторі Дубове, Теремля, Угря, 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, у якій швидкість зменшується з глибиною;

4. у секторі Сваліява – BRI, KOR $q_2=1,001$, $0,95201$, $1,17692$, $1,05068$, $1,0335$ 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.

У пунктах 1–4 показано лише частину прикладів, як за допомогою азимутальних коефіцієнтів q_i можна досліджувати середовище.



Рис. 8. Приклад виділення секторів
Червоним кольором вказані швидкості проходження хвилі в третьому шарі.

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. Обчислені середні значення азимутального коефіцієнта для відповідних секторів із близькими значеннями q_i для одного, двох та трьох шарів та здійснено його використання для аналізу параметрів середовища. Уточнена швидкісна модель для Закарпатського сейсмоактивного регіону. Із збільшенням кількості опрацьованих даних сейсмічних бюлетенів, будуть уточнюватись і середні значення азимутальних коефіцієнтів q_i для всіх секторів. Отримані результати будуть використані для визначення, наприклад, глибини залягання вогнища землетрусу, використовуючи нейронно-мережеве моделювання, що буде показано в наступних публікаціях.

Список використаних джерел:

1. Сейсмологический бюллетень Украины (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011). Севастополь, НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика".
2. Seismological Bulletin of Ukraine, (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011). Sevastopol, RPC "ECOSI-Hydrophysics" (In Russian).
3. Чекунов А.В., Ливанова Л.П., Гейко В.С., (1969). Глубинное строение земной коры и некоторые особенности тектоники Закарпатского прогиба. Сов. Геология, 57-69.
4. Chekunov A., Livanova L., Geiko V., (1969). Deep crustal structure and tectonics of some features of the Transcarpathian deflection. Sov. Geology, 57-69.
5. Lin F., Ritzwoller M., Yang Y., Moschetti M., Fouch M., (2010). The stratification of seismic azimuthal anisotropy in the western US. American Geophysical Union. Fall Meeting.
6. Perry H., Eaton D., Forte A. (2002). LITH5.0: a revised crustal model for Canada based on Lithoprobe results. Geophys. J. Int., 150, 285-294.

Надійшло до редколегії 14.01.14

E. Kozlovskyy, Lead. Eng.,
D. Malysky, Dr. Sci., Prof.,
E-mail: dmytro@cb-igph.lviv.ua
A. Pavlova, Postgraduate Student
Carpathian Branch of
Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine
3-b Naukova Str., Lviv, 79060 Ukraine

DETERMINING AND ANALYSIS OF AZIMUTHAL COEFFICIENTS Q_i FOR THE SEISMICALLY ACTIVE TRANSCARPATHIANS

The aim of this paper is to clarify the velocity model of the Transcarpathian seismic region. The model will further be implemented in neural-network modelling to calculate and verify the depth and distribution of earthquake foci. There has been carried out an analysis of seismic wave propagation in different directions across the Transcarpathian seismic region. Being an important parameter indicative of the direction of wave propagation in a natural medium, the azimuthal coefficient q_i has proved to be efficient in developing a training neural network set. Two methods of

selecting sectors have been shown, based either on the location of a seismic station or a seismic event area. We have calculated average values of the azimuthal coefficient q_i for sectors with close values of q_i for one-, two- and three-layered media according to the depth of earthquake foci in each of the three layers. With three-layered media covering earthquake foci depths of 8,000-9,000 m, the calculations accurately reflect local seismic events in the Carpathians. An average layer thickness h and an average layer velocity v were calculated separately for each E-S pair (epicenter - seismic station). Conventional combining of layers was used as a method of calculating the third layer azimuth coefficient q_i . The calculations were made for direct P-waves (similar calculations can be made for S-waves). We have suggested an interpretation of the obtained results and their practical implications. It has been demonstrated how the azimuthal coefficient can be used in analysing the parameters of media.

Keywords: Transcarpathian seismic region, azimuthal coefficient q_i , a training neural network set, average velocity of wave propagation in a layer, depth of the earthquake focus, direct P- and S-waves, E-S pair (epicenter - seismic station), conventional velocity of wave propagation in combined layers.

Э. Козловский, вед. инж.,
Д. Малицкий, д-р физ.-мат. наук, проф., dmytro@cb-igph.lviv.ua,
А. Павлова асп., susyinet@gmail.com,
Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
ул. Научная, 3-б, г. Львов, Украина, 79060

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ АЗИМУТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ q_i ДЛЯ ЗАКАРПАТСКОГО СЕЙСМОАКТИВНОГО РЕГИОНА

Целью представленной работы является уточнение скоростной модели Закарпатского сейсмоактивного региона для дальнейшего ее использования в нейронно-сетевом моделировании для решения задачи расчета и уточнения глубины залегания источников местных землетрясений. Проведен анализ поведения распространения сейсмических волн в разных направлениях Закарпатского сейсмоактивного региона. Обосновано введение азимутального коэффициента q_i для применения в обучающей выборке нейронной сети, как параметра, отвечающего за направление распространения волны в реальной среде. Показано два способа выделения секторов когда за основу взято или сейсмостанция, или область сейсмических событий. Вычислены средние значения азимутального коэффициента q_i для соответствующих секторов с близкими значениями q_i для одно, двух и трех-слоистой среды в соответствии с глубиной расположения очага землетрясения в первом, втором или в третьем слое. Поскольку трех-слоистая среда охватывает глубины нахождения источников землетрясений в 8000-9000 м, то проведенные расчеты полностью отражают местные сейсмические события Карпатского региона. Расчет средних мощностей слоев h и средних скоростей слоев v вычисляются отдельно для каждой пары E-S (эпицентр - сейсмостанция). Для расчета азимутального коэффициента q_i третьего слоя использован метод условного объединения слоев. Представлены расчеты, которые выполнены для прямой P -волны (аналогичные расчеты можно сделать и для S-волны). Исчислена относительная погрешность расчета среднего значения азимутального коэффициента q_i для каждого сектора, проведенного на основе 4 - 26 событий для соответствующих секторов в зависимости от имеющегося количества данных о событиях, выбранных из сейсмологических бюллетеней. Проведено интерпретацию полученных результатов и рассмотрены варианты использования данной методики. На примерах показано использование азимутального коэффициента q_i для анализа параметров среды.

Ключевые слова: Закарпатский сейсмоактивный регион; азимутальный коэффициент q_i ; обучающая выборка нейронной сети; средняя скорость распространения волны в слое; глубина расположения источника землетрясения; прямые P и S -волны; пары E-S (эпицентр - сейсмостанция); условная скорость прохождения волной объединенных слоев.