

НЕЙРОННО-МЕРЕЖЕВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ УТОЧНЕННЯ ЧАСУ ВСТУПУ ПРЯМОЇ P -ХВИЛІ І РОЗРАХУНКУ ГЛИБИНИ РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЗЕМЛЕТРУСУ

Е.М. Козловський, Д.В. Малицький, А.Ю. Павлова

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, вул. Наукова, 36, Львів 79060, Україна, susyinet@gmail.com

Показано доцільність використання нейронно-мережевого моделювання для розв'язання задачі розрахунку та уточнення глибини розміщення джерел і часів вступу прямої P -хвилі місцевих землетрусів Закарпатського сейсмоактивного регіону. Обґрунтовано введення азимутального коефіцієнта q_i для уточнення швидкісної моделі, яка використовується у навчальній вибірці нейронної мережі. Обчислено середні значення азимутального коефіцієнта q_i для відповідних секторів із близькими значеннями q_i для одно-, дво- і тришароватого середовища у відповідності до глибини залягання вогнища землетрусу в першому, другому або третьому шарі. За допомогою нейронно-мережевого моделювання розраховано глибини розміщення вогнищ землетрусів й часів вступів P -хвиль і уточнення даних, які вказано у сейсмологічних бюлетенях. Проведено інтерпретацію отриманих результатів та наведено приклади порівняння глибин і часів вступу P -хвилі — прогнозованих за допомогою нейронно-мережевого моделювання і вказаних у сейсмологічних бюлетенях.

Ключові слова: Закарпатський сейсмоактивний регіон, азимутальний коефіцієнт q_i , навчальна вибірка нейронної мережі, глибина розміщення джерела землетрусу, прямі P - та S -хвилі, пари $E-S$ (епіцентр—сейсмостанція), функція активації ваг.

Вступ. У Закарпатському сейсмоактивному регіоні з різних технічних причин не завжди вдається зафіксувати землетрус чотирма та більшою кількістю сейсмічних станцій і, відповідно, розрахувати глибину розміщення джерела сейсмічної події. Проблематичним є також визначення часів вступу сейсмічної хвилі. Розв'язання таких задач можливо із застосуванням іншого підходу, а саме використанням статистичного аналізу.

Одним з інструментів статистичного аналізу є програми, що використовують мережі штучних нейронів [7–9]. Для того щоб отримати якісний результат нейронно-мережевого моделювання, необхідно розглянути достатню кількість прикладів і 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 зареєстровані в районі Закарпаття, які описано в сейсмологічних бюлетенях за 2002–2012 р. [5].

У статті наведено результати розрахунків для одно-, дво- та тришарового середовища (глибина до 8000–9000 м), для яких відомі глибини залягання вогнищ землетрусів, що повністю охоплюють місцеві сейсмічні події Карпатського регіону.

Викладення основного матеріалу. Модель середовища, яку надалі використано для роботи, побудовано на основі даних сейсмогеологічного розрізу земної кори вздовж Закарпатського прогину (рис. 1) [4, 6].

Аналіз поведінки поширення сейсмічних хвиль у різних напрямках реального неоднорід-

ного середовища Закарпатського сейсмоактивного регіону дав змогу дійти висновку щодо необхідності введення додаткового параметра, який би відповідав за зміну швидкості поширення хвилі з різних напрямків (різні пари епіцентр—сейсмостанція ($E-S$)). У публікації [10] американські науковці використали моделі, в яких швидкості поширення сейсмічних хвиль залежать від азимуту, а в статті [11] канадські сейсмологи описали моделі типу LITH5.0, в яких використано зміну швидкостей й інших параметрів на сітці $5^\circ \times 5^\circ$ та всередині кожної такої клітинки завдяки великій кількості сейсмічних станцій та зареєстрованих ними подій. У зв'язку з обмеженою кількістю сейсмостанцій, що характерно для Закарпаття, слід шукати інший підхід. Оскільки швидкості поширення сейсмічних хвиль у різних напрямках суттєво розрізняються і математично прив'язати азимут як компоненту навчальної вибірки прикладів для мережі штучних нейронів неможливо, пропонуємо інший параметр, що відповідає за напрямок поширення хвилі та використаний для уточнення швидкісної моделі Закарпаття, — азимутальний коефіцієнт q_i .

Перейдемо до визначення параметра q_i із урахуванням різних глибин залягання вогнища землетрусу, тобто розміщення джерела в 1-му, 2-му або 3-му шарі. Нижче наведено розрахунки для прямої P -хвилі (аналогічні розрахунки можна виконати і для S -хвилі). Першочерговим завданням є розрахунок швидкості поширення сейсмічної хвилі від джерела до сейсмостанції на основі

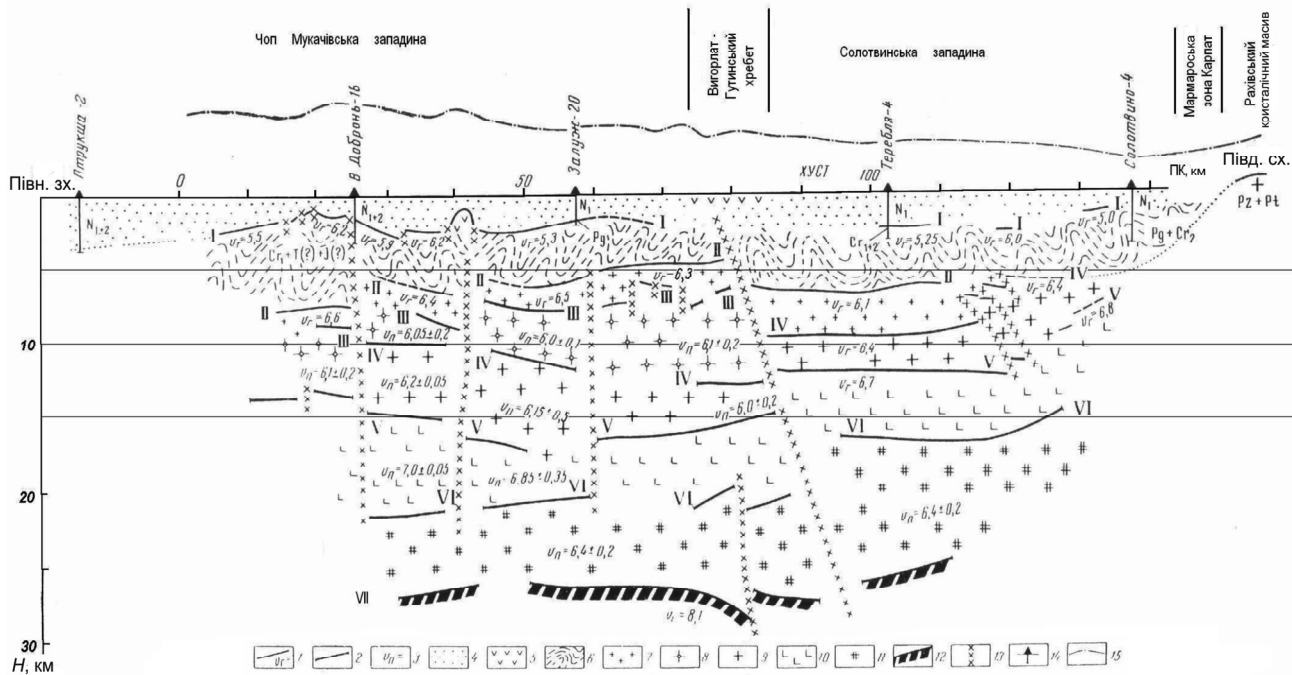


Рис. 1. Сейсмогеологічний розріз земної кори вздовж Закарпатського прогину: 1 – заломлювальні горизонти із зазначеними граничними швидкостями (V); 2 – відбивні горизонти (I–VII); 3 – пластова швидкість, км/с; 4 – неогенова моласа; 5 – вулканіти в осадовому чохлі; 6 – мезозойсько-палеогенова складчаста основа прогину; 7 – палеозойський (?) метаморфізований фундамент; 8 – шар пониженої швидкості всередині “гранітного” шару; 9 – докембрійський (?) кристалічний комплекс; 10 – “базальтовий” шар; 11 – шар пониженої швидкості в основі земної кори; 12 – поділ Мохоровичича; 13 – розломи; 14 – бурова свердловина; 15 – крива Δg

швидкостей, вказаних на сейсмогеологічному розрізі земної кори вздовж Закарпатського прогину (рис. 1). Вважаємо, що шляхи поширення хвилі в реальному та змодельованому нами середовищах однакові.

Для джерел сейсмічних хвиль, що залягають у 1-му – 3-му шарах, отримуємо такі рівняння [1–3]:

для 1-го шару

$$v_{a1} = v_1 q_1,$$

для 2-го шару із рівняння

$$Bx^4 - Cx^3 + Dx^2 + Ex + E = 0,$$

де

$$A = \varepsilon^2 + h_1^2 + h_2^2;$$

$$B = \frac{v_1^4 - 2v_1^2 v_2^2 + v_2^4}{v_1^4 v_2^4}; \quad C = \frac{4\varepsilon \left(\frac{v_1^2 + v_2^2}{v_1^2 v_2^2} \right);$$

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

$$I = \frac{4t_r^2 \varepsilon}{v_2^2} - \frac{4\varepsilon^3 + 4\varepsilon h_2^2}{v_2^4} + \frac{4\varepsilon h_1^2}{v_1^2 v_2^2};$$

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

знаходимо

$$v_{a2} = v_2 q_2.$$

Об'єднавши 1-й та 2-й шари в один із умовною швидкістю поширення хвилі W_a^* , для 3-го шару отримуємо [6]

$$v_{a3} = v_3 q_3.$$

Таким чином, для різних моделей середовища залежно від глибини залягання вогнища землетрусу побудовано методику визначення азимутальних коефіцієнтів q_i , якщо джерело залягає у 1-му, 2-му або 3-му шарах, та отримано уточнені швидкості, з якими хвиля проходить від епіцентру до кожної сейсмостанції, що зареєструвала сейсмічну подію.

Слід зазначити, що середні потужності шарів h_1 та h_2 , середні швидкості у шарах v_1 , v_2 та v_3 обчислено для кожної пари $E-S$ за значеннями глибин і швидкостей із сейсмогеологічного розрізу (рис. 1); епіцентральною відстань ε уточнено за допомогою програми deltacalc.

Оскільки коефіцієнти q_i достатньо близькі у певних азимутальних секторах, розраховано середнє значення q_i на основі 4–26 подій для кожного сектора залежно від наявної кількості даних щодо подій, які вибрано із сейсмологічних бюлетенів. Для подальших досліджень розглянуто варіант, коли за основу взято зони сейсмічних подій, і виділено сектори до сейсмостанцій (рис. 2). Наприклад, виділяємо сектор, що охоплює зони сейсмічних подій біля Тересви, Тячева,



Рис. 2. Приклад секторів із близькими швидкостями поширення P -хвиль від джерела до сейсмостанцій для першого, другого і третього шарів

Тереблї, Углі, Хуста, Мукачєвого та відповідні станції реєстрації: NSL, BRI, MUKU, UZH. Блакитним кольором показано скупчення епіцентрів сейсмічних подій, червоним — розташування сейсмічних станцій. Стрілка вказує на напрямок $E-S$. Сектори з близькими значеннями q_i позначено однаковим кольором. Над стрілкою (чорним кольором) указано середнє значення азимутального коефіцієнта 1-го шару q_1 для певного сектора, під стрілкою (синім кольором) — середнє значення q_2 для 2-го шару, позаду стрілки (червоним кольором) — середнє значення q_3 для 3-го шару. На рис. 2 наведено лише частину секторів для меншої завантаженості рисунка. Відносна похибка розрахунку середнього значення азимутального коефіцієнта q_i для одного сектора становить від 0,5 до 6 %.

Отже, отримано уточнену швидкісну модель Закарпатського сейсмоактивного регіону, яку використано для подальших розрахунків.

Для задач уточнення часу вступу хвилі і розрахунку глибини розміщення джерела землетрусу за допомогою нейронно-мережевого моделювання опрацьовано 86 сейсмічних подій за період

2002–2012 рр., з яких відібрано 370 прикладів для навчання нейронної мережі. Для розрахунків застосовано програму Statistica 7.

Використані змінні:

- E_p — уточнена епіцентральна відстань;
- H — відстань від верхньої межі шару, в якому знаходиться вогнище, до джерела землетрусу;
- h_1, h_2 — потужності шарів, які визначено, згідно з рис. 1;
- v_1, v_2, v_3 — уточнені швидкості поширення P -хвилі;
- T — час вступу P -хвилі (згідно з бюлетенем) [5].

Оскільки землетрусів з глибиною 1000 м на Закарпатті немає (у бюлетенях ця глибина вказана лише для означення шару, в якому знаходиться джерело), значення параметрів видалено із навчальної вибірки для пізнішого перерахунку. Навчальну вибірку для нейронної мережі побудовано за принципом секторів з однаковим середнім значенням азимутального коефіцієнта q_i , відповідно до секторів, які показано на рис. 2, для того, щоб дані для нових розрахунків розмішувати у відповідних секторах.

Таблиця 1. Прогнозовані за допомогою нейронно-мережевого моделювання глибини залягання джерел землетрусу

№	E_p , м	h_1 , м	h_2 , м	v_1 , м/с	v_2 , м/с	v_3 , м/с	T , с	H , м	H_{pr} , м
1	15850	0	0	5271,28	0	0	3	2100	2062,632
2	6620	0	0	5271,28	0	0	1,2	1000	1931,015
3	11950	0	0	5271,28	0	0	2,2	1000	2013,411
4	11080	0	0	5271,28	0	0	2,2	2000	2024,591
5	33760	0	0	5254,55	0	0	6,4	1000	2011,834
6	28330	0	0	5254,55	0	0	5,4	1000	2066,917
7	30740	0	0	5254,55	0	0	6	2000	2039,312
8	40270	0	0	5254,55	0	0	7,7	2100	1974,682
176	15250	2800	0	5271,28	6618,7	0	2,8	3200	3326,178
177	21080	2600	0	5250	5208,17	0	4	3200	2800,552
178	27410	2600	0	5250	5208,17	0	5,3	3200	1794,866
179	15320	2600	0	5320,7	4919,82	0	3	3200	2716,647
180	16940	2600	0	5320,7	4919,82	0	3,3	2400	2709,596
181	15920	2600	0	5320,7	4919,82	0	3,1	2400	2714,147
182	24410	2600	0	4821,1	5305,44	0	4,9	2400	2828,013
323	40080	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,5	900	919,947
324	38780	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,3	700	935,261
325	38670	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,3	800	935,999
326	38830	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,3	900	934,926
327	39570	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,4	900	926,391
328	38050	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,2	800	944,455
329	42080	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	7,8	800	901,494
330	43740	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	8	700	891,005

Для прогнозування глибини залягання джерела землетрусу використано нейронну мережу MLP 5:5-6-1:1 (з одним прихованим шаром). Середня відносна похибка при прогнозуванні становить $\approx 3,5\%$. За допомогою нейронних мереж перерахунок глибини джерел тих землетрусів, що вказано у бюлетенях, як 1000 м, дав результат ≈ 2000 м (табл. 1, колонка 8, 9).

У табл. 1 наведено приклади подій з № 1–8, що відбулися у 1-му шарі, з № 176–182 – у 2-му шарі, з № 323–330 – у 3-му шарі, де H_{pr} – прогнозована відстань (у шарі, в якому знаходиться вогнище) від верхньої межі шару до джерела землетрусу.

Оскільки дані однієї сейсмічної події розміщено по різних секторах, для перевірки результатів прогнозування потрібно розглянути результати для кожної окремої події. Нижче наведено кілька прикладів визначення глибини вогнищ землетрусів з використанням даних на різних станціях. Зокрема, для сейсмічних подій у районі Мукачєвого розрахунки наведено в табл. 2.

Згідно з даними табл. 2, максимальна різниця між глибинами події 22 червня 2005 р. сягає ≈ 60 м, події 31 жовтня 2005 р. ≈ 3 м, що свідчить про досить точний розрахунок глибин залягання вогнищ землетрусів за допомогою нейронно-мережевого моделювання.

Таблиця 2. Результати прогнозування сейсмічних подій, Закарпаття, район Мукачєвого

E_p , м	V_1 , м/с	T , с	H , м	H_{pr} , м	Ст
22 червня 2005 р.					
4200,00	6154,12	0,8	2000,00	2002,829	MUK
30960,00	5173,91	5,9	2000,00	1981,002	BRI
50580,00	5451,53	9,5	2000,00	2039,265	KOR
48880,00	4723,78	10,3	2000,00	2005,861	TRS
31 жовтня 2005 р.					
7180,00	6154,12	1,2	1300,00	2039,312	MUK
21880,00	5173,91	4,2	1300,00	2039,604	BRI
57790,00	5236,56	11,9	1300,00	2039,059	NSL
58230,00	5034,54	11,5	1300,00	2042,818	MEZ

Примітка: E_p – уточнена епіцентрально відстань; V_1 – уточнена швидкість поширення Р-хвилі в 1-му шарі; T – час вступу Р-хвилі (взятий із бюлетеня); H – глибина розміщення джерела землетрусу; H_{pr} – прогнозована глибина залягання джерела землетрусу; Ст – сейсмічна станція.

Таблиця 3. Часи вступу P -хвиль, розраховані за допомогою нейронно-мерережевого моделювання для вогнищ землетрусів, розміщених у першому (№ 1–8), другому (№ 176–182) і третьому шарах (№ 323–330)

№	E_p , м	h_1 , м	h_2 , м	v_1 , м/с	v_2 , м/с	v_3 , м/с	H , м	T , с	T_{pr} , с
1	15850	0	0	5271,28	0	0	2062,632	3	3,06008
2	6620	0	0	5271,28	0	0	1931,015	1,2	1,20309
3	11950	0	0	5271,28	0	0	2013,411	2,2	2,29294
4	11080	0	0	5271,28	0	0	2024,591	2,2	2,10929
5	33760	0	0	5254,55	0	0	2011,834	6,4	6,51603
6	28330	0	0	5254,55	0	0	2066,917	5,4	5,48962
7	30740	0	0	5254,55	0	0	2039,312	6	5,94845
8	40270	0	0	5254,55	0	0	1974,682	7,7	7,72303
176	15250	2800	0	5271,28	6618,7	0	3326,178	2,8	2,80544
177	21080	2600	0	5250	5208,17	0	2800,552	4	4,02278
178	27410	2600	0	5250	5208,17	0	1794,866	5,3	5,33942
179	15320	2600	0	5320,7	4919,82	0	2716,647	3	3,10471
180	16940	2600	0	5320,7	4919,82	0	2709,596	3,3	3,37426
181	15920	2600	0	5320,7	4919,82	0	2714,147	3,1	3,20420
182	24410	2600	0	4821,1	5305,44	0	2828,013	4,9	4,74978
323	40080	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	919,947	7,5	7,40587
324	38780	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	935,261	7,3	7,17244
325	38670	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	935,999	7,3	7,15376
326	38830	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	934,926	7,3	7,18093
327	39570	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	926,391	7,4	7,31315
328	38050	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	944,455	7,2	7,04194
329	42080	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	901,494	7,8	7,76247
330	43740	2000	3900	5227,36	6384,57	6360,88	891,005	8	7,05457

Наступним кроком є уточнення часу вступу P -хвилі.

Для прогнозування часів вступу P -хвилі використано нейронну мережу MLP 7:7-7-5-1:1 з двома прихованими шарами та змішаним типом функції активації для ваг (підібрано окремо для кожного шару) (табл. 3).

Для використаної нейронної мережі коефіцієнт кореляції T і T_{pr} становив $\approx 0,98$, середня похибка розрахунку $\approx 2\%$, максимальна похибка розрахунку окремого прикладу $\approx 11\%$, що є доволі добрим результатом.

На рис. 3 показано графік співвідношення часів, які вказано у сейсмологічному бюлетені, та часів, прогнозованих за нейронною мережею. Згідно з побудованими залежностями, спостерігаються лише поодинокі відхилення від основної лінії, на яку лягають дані у бюлетені та прогнозовані.

Для порівняння часів вступу P -хвилі, взятих із сейсмологічного бюлетеня, з часами вступу P -хвилі, розрахованими за допомогою нейронно-мерережевого моделювання, показано декілька прикладів на реальних сейсмограмах. На рис. 4, 5 перша вертикальна лінія показує час вступу, взятий із бюлетеня, друга – час вступу, прогнозований нейронною мережею, який є набагато точніший.

На рис. 5, а для даних, взятих із бюлетеня, де $E_p = 6180$ м; $H = 3100$ м; $t_b = 0,3$ с, за гіпоцентральної відстані $hip = 6914$ м швидкість P -хвилі

має бути $v_b \approx 23\,000$ м/с, що є нереальним. Для часу, прогнозованого нейронною мережею, $t_{HM} = 1,37$ с, швидкість становить $v_{pr} \approx 5800$ м/с.

На рис. 5, б для даних, взятих із бюлетеня, де $E_p = 6460$ м; $H = 3000$ м; $t_b = 0,6$ с, за гіпоцентральної відстані $hip = 7123$ м швидкість P -хвилі має бути $v_b \approx 12\,000$ м/с, для часу, прогнозованого нейронною мережею, $t_{HM} = 1,41$ с, швидкість становить $v_{pr} \approx 5800$ м/с.

Такі великі швидкості можна пояснити збоєм часу прив'язки на сеймостанції.

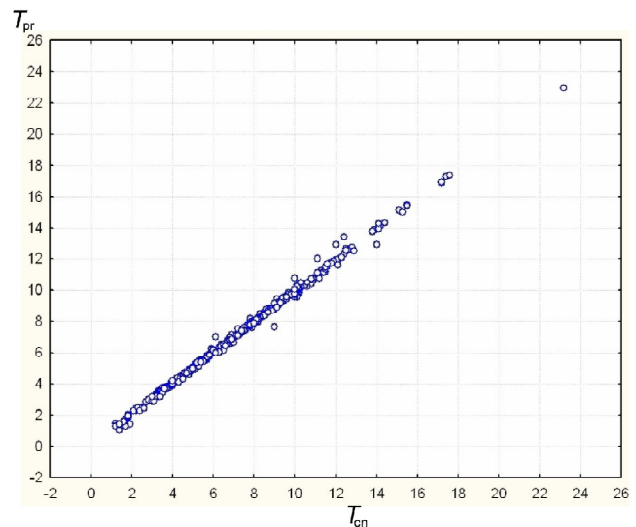


Рис. 3. Співвідношення часів, указаних у сейсмологічному бюлетені, та часів, прогнозованих за нейронною мережею

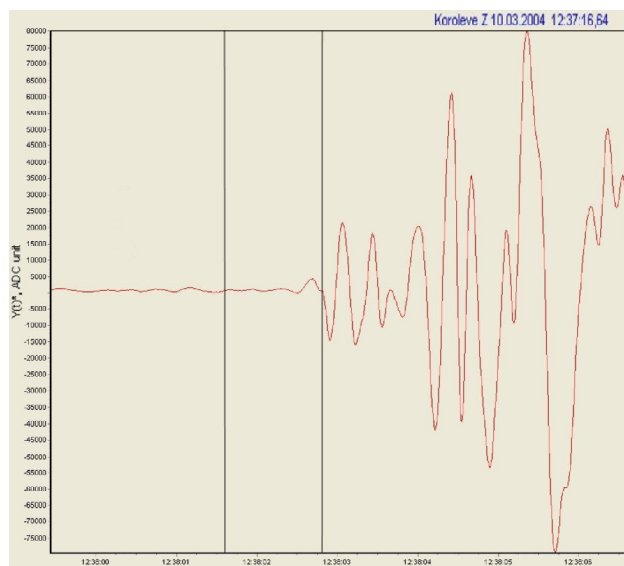
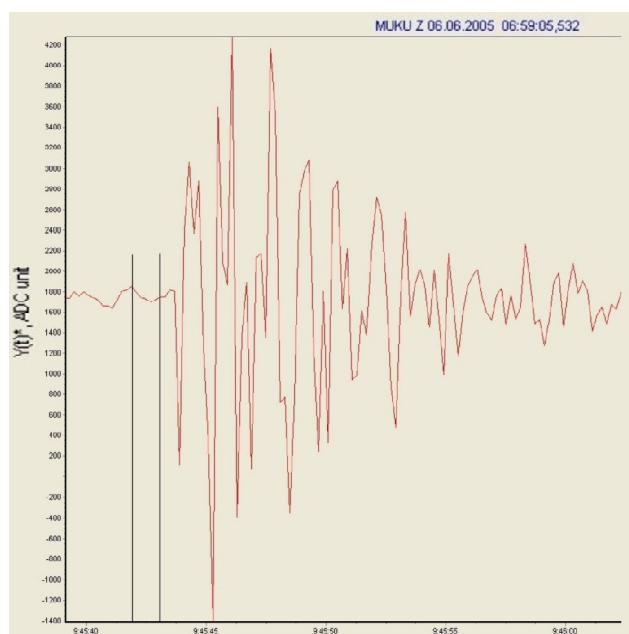
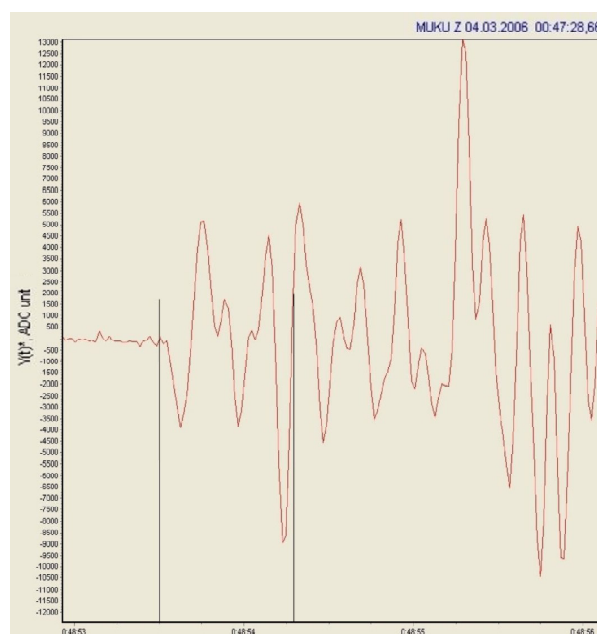


Рис. 4. Порівняння часу вступу P -хвилі землетрусу, який відбувся 10.03.2004 р., зареєстрованого сейсмічною станцією “Королеве”, із часом вступу, прогнозованим за нейронною мережею



а



б

Рис. 5. Порівняння часів вступу P -хвилі землетрусів, які відбулися 06.06.2005 р. (а) та 04.03.2006 р. (б), зареєстрованих сейсмічною станцією “Мукачеве”, із часами вступу, прогнозованими за нейронною мережею

Висновки. Введення середнього значення азимутального коефіцієнта q_i для секторів дало можливість уточнити швидкісну модель Закарпаття та використати її для навчальної вибірки нейронної мережі. За допомогою нейронно-мережевого моделювання для Закарпатського сейсмоактивного регіону можливо розраховувати глибину залягання вогнища землетрусу, часи вступу P - і S -хвиль та уточнювати глибини залягання вогнища землетрусу й часи вступу P - і S -хвиль, указані у сейсмологічних бюлетенях.

1. Козловський Е.М. Розрахунок та аналіз азимутальних коефіцієнтів q_i та уточнення швидкісної моделі Закарпатського сейсмоактивного регіону / Е.М. Козловський, Д. В. Малицький, А. Павлова // Вісник КНУ. Геологія. — 2014. — Вип. 1(64). — С. 30–33.
2. Малицький Д.В. Про джерело сейсмічних хвиль / Д.В. Малицький // Геофізичний журнал. — 2005. — Т. 27, № 2. — С. 304–308.
3. Малицький Д.В. Аналіз результатів математичного моделювання теоретичних сейсмограм / Д.В. Малицький, Е.М. Козловський, О.І. Хитряк // Вісник Київ.

- нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Сер. Геологія. — 2009. — Вип. 47. — С. 51–54.
4. Малицький Д.В. Застосування матричного методу в обернених задачах з використанням реальних записів / Д.В. Малицький, А.Ю. Павлова, Е.М. Козловський, О.Д. Грицай // Геодинаміка. — 2013. — № 2 (15). — С. 265–267.
 5. Сейсмологический бюллетень Украины (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012) / Под ред. Б.Г. Пустовитенко. — Севастополь, НПЦ “ЭКОСИ-Гидро-физика”.
 6. Чекунов А.В. Глубинное строение земной коры и некоторые особенности тектоники Закарпатского прогиба / А.В. Чекунов, Л.П. Ливанова, В.С. Гейко // Сов. геология. — 1969. — № 10. — С. 57–69.
 7. Abbott L.F. Learning in Neural Network Memories / L.F. Abbott // Network: Comp. Neural Sys. — 1990. — V. 1. — P. 105–122.
 8. Amit D.J. Effective neurons and attractor neural networks in cortical environment / D.J. Amit, M.V. Tsodyks // Network. — 1991. — V. 3. — P. 121–138.
 9. Byrne J.H. Neural Models of Plasticity / J.H. Byrne, W.O. Berry. — San Diego: Acad. Press, 1989.
 10. Lin F. The stratification of seismic azimuthal anisotropy in the western US / F. Lin, M. Ritzwoller, Y. Yang, M. Moschetti, M. Fouch. — Amer. Geophys. Union. Fall Meeting. — San Francisco, 2010.
 11. Perry H. LITH5.0: a revised crustal model for Canada based on Lithoprobe results / H. Perry, D. Eaton, A. Forte // Geophys. J. Int. — 2002. — V. 150. — P. 285–294.

НЕЙРОННО-СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ УТОЧНЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВСТУПЛЕНИЯ ПРЯМОЙ P -ВОЛНЫ И РАСЧЕТА ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ИСТОЧНИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

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

Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, ул. Научная, 3б, Львов 79060, Украина, susyinet@gmail.com

Показана целесообразность использования нейронно-сетевого моделирования для решения задачи расчета и уточнения глубины залегания источников и времен вступления прямой P -волны местных землетрясений Закарпатского сейсмоактивного региона. Обосновано введение азимутального коэффициента q_i для уточнения скоростной модели, используемой в обучающей выборке нейронной сети. Вычислены средние значения азимутального коэффициента q_i для соответствующих секторов с близкими значениями q_i для одно-, двух- и трехслойной среды в соответствии с глубиной расположения очага землетрясения в первом, втором или третьем слое. С помощью нейронно-сетевого моделирования рассчитаны глубины расположения очагов землетрясений и времен вступлений P -волн и уточнены данные, которые указаны в сейсмологических бюллетенях. Проведена интерпретация полученных результатов и даны примеры сравнения глубин и времен вступления P -волны — прогнозируемых с помощью нейронно-сетевого моделирования и указанных в сейсмологических бюллетенях.

Ключевые слова: Закарпатский сейсмоактивный регион, азимутальный коэффициент q_i , обучающая выборка нейронной сети, глубина залегания источника землетрясения, прямые P - и S -волны, пары $E-S$ (эпицентр — сейсмостанция), функция активации весов.

NEURAL-NETWORK MODELING FOR PROBLEMS OF REFINING THE ARRIVAL TIMES OF THE FIRST P -WAVES AND CALCULATION THE DEPTH OF THE EARTHQUAKE SOURCE

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

Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics NAS of Ukraine, Naukova st. 3b, Lviv 79060, Ukraine, susyinet@gmail.com

A neural network is a powerful data modeling tool that is able to capture and represent complex input/output relationships. The motivation for the development of neural network technology stemmed from the desire to develop an artificial system that could perform “intelligent” tasks. The purpose of this paper is to show the feasibility of using neural-network modeling for calculating and refining the depth distribution of earthquake sources and arrival times of the first seismic waves of local earthquakes in the Transcarpathians seismic active region. In this paper, use was made of the most common neural network model (the multilayer perceptron (MLP)). This type of neural network is known as a supervised network because it requires a desired output in order to learn. The goal of this type of network is to create a model that correctly maps the input to the output using historical data so that the model can then be used to produce the output when the desired output is unknown. The authors have proved justified the introduction of azimuthal coefficient q_i to be used in a teaching set for neural networks as a parameter responsible for the direction of the wave propagation in a real environment. Average values of the azimuthal coefficient q_i for sectors with close values of q_i have been calculated for one-, two- and three-layered medium, according to the depth distribution of the earthquake source in the corresponding layer. Neural-network modeling was used to calculate the depth of the earthquake source and arrival times of P -waves, and to specify the data from seismological bulletins. 370 examples for the period 2002–2012 to train the neural network were selected to

refine the depth distribution of earthquake sources and arrival times of the first seismic waves. The interpretation of the results was carried out. Comparison has been made between the depths and arrival times of the first *P*-waves projected using neural-network modeling with the data from the seismological bulletins. The correlation coefficient between the arrival times obtained using neural-network modeling *T_{pr}* and the data from the seismological bulletins *T* is equal 0.98.

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

References:

1. Kozlovskyy E., Malyskyy D., Pavlova A., *Rozrahunok ta analiz azymutal'nykh koefitsientiv q_i ta utochnennia shvydkisnoi modeli Zakarpatskoho seismoaktyvnoho rehionu* [Determining and analysis of azimuthal coefficients *q_i* for the seismically active region of Transcarpathians]. *Visnyk KNU. Heologia* [Visnyk KNU. Geology], 2014, issue 1(64), pp. 30–33.
2. Malyskyy D. *Pro dzherelo seismichnykh hvyl* [The source of seismic waves]. *Geofizicheskij zhurnal* [Geophysical journal], 2005, vol. 27, no. 2, pp. 304–308.
3. Malyskyy D., Kozlovskyy E., Khytriak O. *Analiz resultativ matematychnoho modeluvannia teoretychnykh seismogram* [Analysis of the mathematical modelling results of theoretical seismograms]. *Visnyk KNU. Heologia* [Visnyk KNU. Geology], 2009, vol. 47, pp. 51–54.
4. Malyskyy D., Pavlova A., Kozlovskyy E., Hrytsai O. *Zastosuvannya matrychnoho metodu v obernenykh zadachah z vykorystanniam realnykh zapysiv* [Application of matrix methods in inverse problems using real records]. *Geodynamika* [Geodynamics], 2013, no. 2 (15), pp. 265–267.
5. *Seismologicheskyy bulletin Ukrainy (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012)* [Seismological Bulletin of Ukraine (2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011)] / Pod red. B.H. Pustovitenko. Sevastopol, NPS “EKOSI-Hydrophysica”.
6. Chekunov A., Livanova L., Geiko V. *Hlubinnoe stroenie zemnoj kory i nekotorye osobenosti tektoniki Zakarpatskoho prohyba* [Deep crustal structure and tectonics of some features of the Transcarpathian deflection]. *Sov. Heologiya* [Sov. Geology], 1969, no. 10, pp. 57–69.
7. Abbott L.F. Learning in Neural Network Memories. *Network: Comp. Neural Sys.*, 1990, vol. 1, pp. 105–122.
8. Amit D.J., Tsodyks M.V. Effective neurons and attractor neural networks in cortical environment. *Network*, 1991, vol. 3, pp. 121–138.
9. Byrne J.H., Berry W.O. *Neural Models of Plasticity*. San Diego: Academic Press, 1989.
10. 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. San Francisco, 2010.
11. Perry H., Eaton D., Forte A. LITH5.0: a revised crustal model for Canada based on Lithoprobe results. *Geophys. J. Int.*, 2002, vol. 150, pp. 285–294.

Надійшла до редакції 07.04.2014 р.
Received 07/04/2014