

Поле сейсмічних хвиль. У результаті сейсмічного польового експерименту були отримані сейсмограми хорошої якості. У досліджуваному полі сейсмічних хвиль було виділено всі корисні сейсмічні фази, необхідні для інтерпретації і побудови швидкісної моделі земної кори та верхньої мантії. Деякі приклади ділянок сейсмічних записів показано на рис. 1. Вони побудовані для ближніх пунктів вибуху (SP29202 та SP29210) і містять корисні фази хвиль на всій довжині профілю.

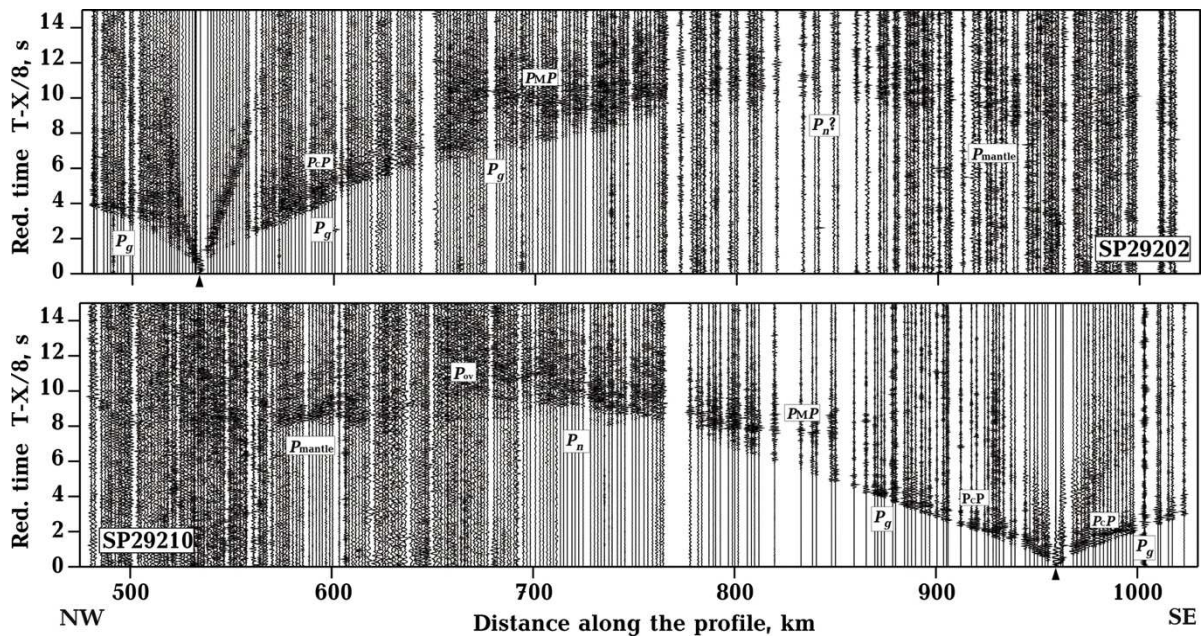


Рис. 1. Амплітудно-нормований сейсмічний розріз вертикальної складової поздовжніх P -хвиль пунктів вибуху SP29202 та SP29210. Швидкість редукції становить 8,0 км/с: P_g — заломлення у верхній та середній кристалічній корі; P_{ov} — закритична фаза хвилі в корі; $P_c P$ — відбиття від межі всередині кори; $P_M P$ — P -хвилі, відбиті від поверхні Мохо; P_n — заломлення у верхній мантії безпосередньо під поверхнею Мохо; P_{mantle} — фази P -хвиль у верхній мантії. Розташування пунктів вибуху показано на рис. 2.

Хвильове поле містить вступи заломлених фаз P -хвиль, а саме P_{sed} — в осадових шарах, P_g та P_{ov} — у фундаменті й глибших шарах земної кори, P_n — заломлення в поверхні Мохо. Перші вступи P -хвиль формуються заломленими хвилями від верхнього осадового комплексу (P_{sed}) зі зміщенням 0—10 км в обидва боки від пунктів вибуху, за ними вступають фази P_g від верхньої та середньої земної кори на відстані 200 - 220 км, останньою є фаза заломленої хвилі від верхньої мантії (P_n), зафіксована на відстанях до 300-450 км. Усі ці сейсмічні фази хвиль були відібрані та використані під час сейсмічної інверсії. Відбиті фази P -хвиль у корі легко ідентифікуються, але використовуваний томографічний код ґрунтується лише на даних перших вступів. Тому на цьому етапі інтерпретації відбиті фази цих хвиль не використовували. Відбиті фази містять хвилі $P_c P$ від меж у земній корі, $P_M P$ — від поверхні Мохо і P_{mantle} — від меж у середині мантії. Криві, що показують час пробігу згаданих вище фаз заломлених хвиль, є основою для визначення спрощеного розподілу швидкостей у земній корі та верхній мантії.

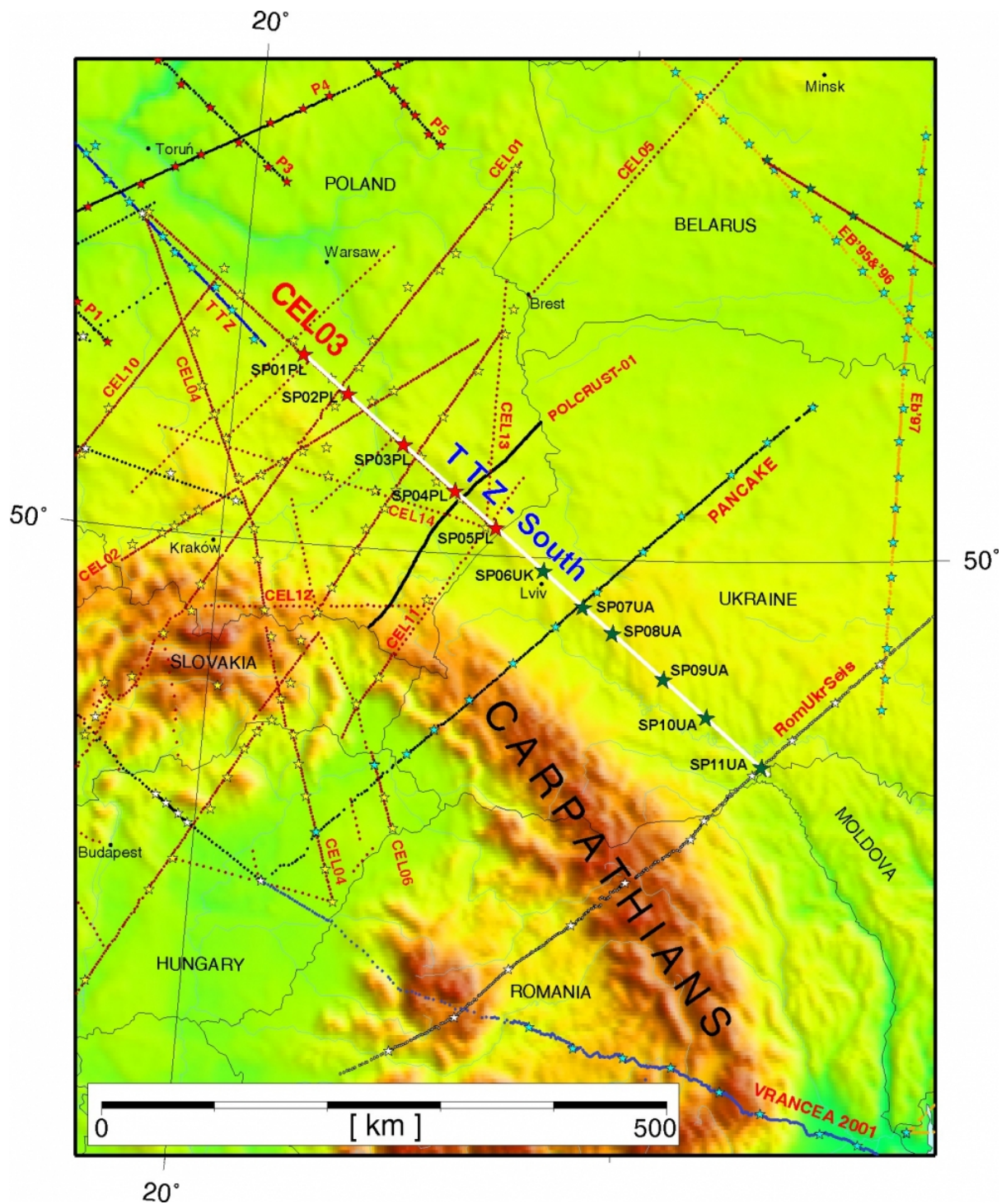


Рис. 2. Схематичне розташування сейсмічного профіля TTZ-South. Червоними зірочками показано положення пунктів вибуху на території Польщі, зеленими – на території України.

Сейсмічне моделювання. Щоб отримати модель розподілу швидкості в корі та верхній мантії, була використана програма сейсмічної томографічної інверсії перших вступів FAST [Zelt, Barton, 1998]. Метою томографічної інверсії є відновлення швидкісних властивостей середовища, у яке проникали сейсмічні хвилі. В основі таких досліджень є час пробігу перших вступів для набору пар джерело-приймач. Можлива будь-яка геометрія джерел та приймачів.

Систему спостережуваних кривих часу пробігу заломлених хвиль у верхній і середній корі (P_g), верхній мантії безпосередньо під поверхнею Мохо (P_n) показано у середній частині рис. 3.

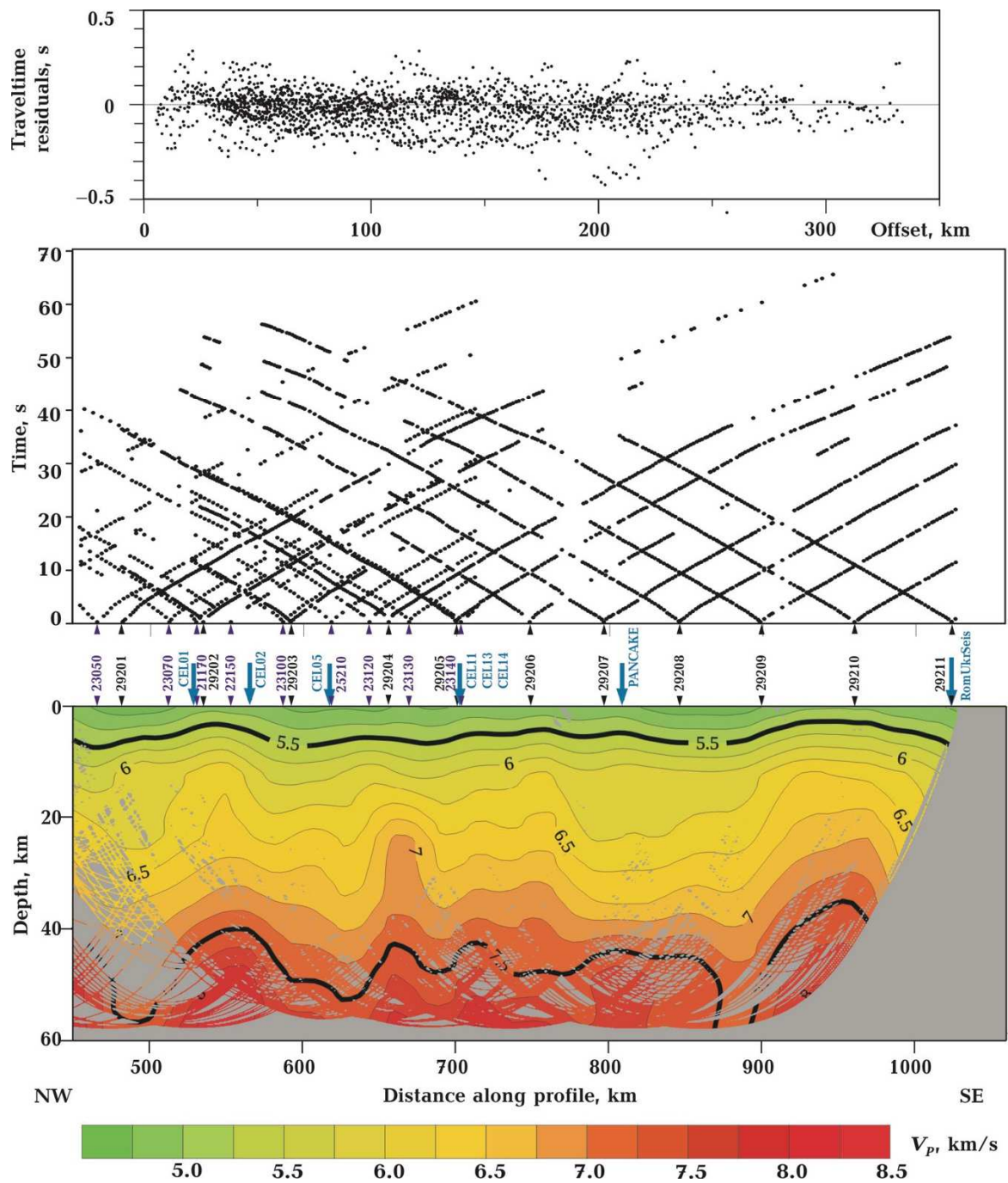


Рис. 3. Нев'язки між спостережуваним та розрахованим часом пробігу (верхня частина рисунка), спостережуваний час пробігу (середня частина рисунка) і швидкісна модель Р-хвиль, яка маскує розрахункові траєкторії променів і отримана за допомогою томографічної інверсії перших вступів (фази P_g та P_n) із використанням програмного пакета FAST (нижня частина рисунка). Вважається, що ізолінії швидкості 5,5 та 7,5 км/с із плавним розподілом значень приблизно відображають розташування меж осадових порід і кристалічного фундаменту та поверхні Мохо відповідно. Трикутниками позначено пункти вибуху на профілях TTZ-South та CEL03, а великими стрілками — точки перетину між сейсмічними профілями.

Як доповнення до 11 пунктів вибуху експерименту TTZ- South використовували час пробігу хвиль P_g та P_n , що записані з 9 пунктів вибуху експерименту CEL03. Положення пунктів вибуху для обох експериментів зображено на рис. 2. Параметризацію швидкості вздовж поперечного розрізу виконували на безперервній прямокутній сітці 401×41 точок з розміром комірок $1,5 \times 0,5$ км. Розмір отриманої моделі становив 600×60 км. Така параметризація моделі не допускає існування стрибків швидкості, за якими визначають геологічні межі або зони розломів. Програма FAST, яка обмежена аналізом лише перших вступів заломлених хвиль, зображує швидкісні границі в отриманій моделі зонами підвищених градієнтів швидкості. Отже, отримана швидкісна модель є обмеженою, оскільки визначена лише за низьким хвильовим числом. Проте модель, отримана методом сейсмічної томографії, показує хорошу збіжність залишкової різниці до мінімуму (рис. 3, верхня схема). Статистичні параметри для отриманої швидкісної моделі містять 2560 променів, середньоквадратичне значення залишкової різниці між спостережуваним і розрахунковим часом пробігу становить 88 мс, а нормоване значення χ^2 — 1,1914.

Алгоритм томографічної інверсії використовує сітку рівномірної швидкості та згладжування без розривів значень швидкостей на межах шарів. Межами в моделі з найбільшими контрастами швидкостей є фундамент осадових порід та поверхня Мохо. Швидкість поширення поздовжніх P -хвиль змінюється приблизно від 5 до 6 км/с у підшві осадового комплексу. Отже, ізолінію швидкості 5,5 км/с можна розглядати як таку, що відображає поведінку та геометрію покрівлі кристалічного фундаменту. Подібним чином швидкість P -хвилі часто збільшується приблизно від 7 до 8 км/с при переході межі кора-мантія. У цьому разі ізолінію 7,5 км/с можна апроксимувати приблизну глибину поверхні Мохо. На нижній схемі (рис. 4) ізолінії 5,5 та 7,5 км/с, що відповідають передбачуваним положенням покрівлі архейського фундаменту та підшви кори, показано чорними суцільними лініями.

Швидкісна модель. Межа між двома профілями — польським та українським — розташована на відстані ~ 700 км уздовж профілю (SP 29205) і приблизно збігається з державним кордоном між Польщею та Україною. Будову земної кори польської частини профілю добре вивчають шість профілів WARR, отриманих під час проекту CELEBRATION 2000, які перетинають профіль TTZ-South у декількох місцях — CEL01, CEL02, CEL05, і три профілі — CEL11, CEL13, CEL14 — безпосередньо вздовж кордону між Польщею та Україною [Grad et al., 2006; Guterch, Grad, 2006; Janik et al., 2011]. Профіль TTZ-South знаходиться на південно-західному продовженні профілю CEL03, який, у свою чергу, є продовженням профілю TTZ [Janik et al., 2005, 2009].

Українська частина профілю TTZ-South перетинається профілем PANCAKE у Львівському прогині поблизу SP29207 [Starostenko et al., 2013] та профілем RomUkrSeis [Starostenko et al., 2020] у найбільш південній його частині в межах Волино-Подільської монокліналі. На рис. 4 показана попередня модель будови земної кори вздовж профілю TTZ-South, отримана із зображень сейсмічної томографії.

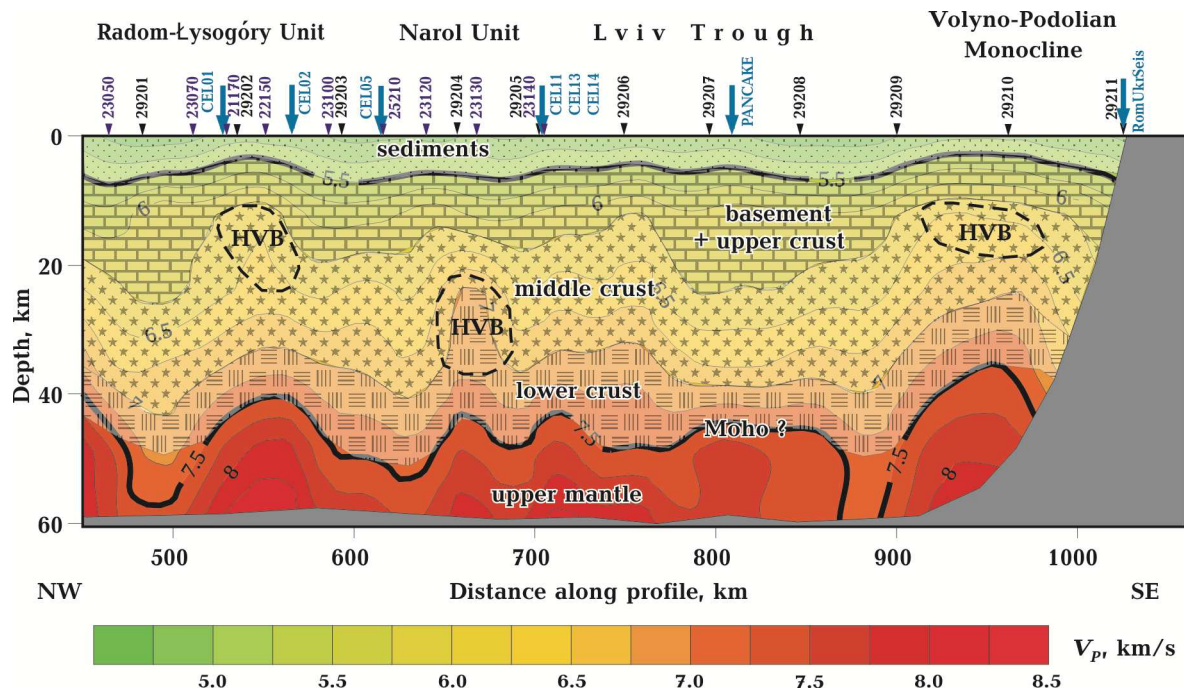


Рис. 4. Попередня інтерпретація моделі будови земної кори за профілем TTZ-South на основі томографічного зображення (див. рис. 3). HVB — високошвидкісне тіло в земній корі. Решту позначень див. на рис. 4.

Уздовж профілю потужність відкладів із V_p до 5,5 км/с змінюється від ~2—3 км на Волино-Подільській монокліналі до 6—8 км у Львівському прогині та блоці Нароль Серединнопольського валу (антиклінорію). Топографія поверхні Мохо, що інтерпретується як ізолінія швидкості 7,5 км/с, демонструє коротко- та довгохвильові коливання вздовж більшої частини профілю. Глибина поверхні Мохо становить 45—47 км у центральній частині профілю і піднімається до глибини 40 та 37 км на північній (Радом-Лисогорський блок) і південній (Волино-Подільська монокліналь) частинах профілю відповідно.

Хоча підхід до моделювання (томографічна інверсія) не дає сейсмічних меж між шарами в земній корі, припускаємо, що можна попередньо виокремити шари в корі відповідно до змодельованих значень швидкості (див. рис. 5). Верхня частина швидкісної моделі, між ізолініями V_p 5,5 та 6,2 км/с, відповідає, найімовірніше, фундаменту (едиакарський період і ранній палеозой) та верхній корі, що піднімаються до ~10 км під південним Радом-Лисогорським блоком і Волино-Подільською моноклінальною та заглиблюються до 18 км під блоком Нароль. Найбільші його глибини (22—23 км) передбачаються під Львівським прогином і Радом-Лисогорським блоком на північному кінці профілю.

Характерною особливістю швидкісного зображення сейсмічної томографії є три локальні збільшення ізоліній швидкості, що показані на рис. 5 у вигляді високошвидкісних тіл (HVB). Перше тіло залягає в покрівлі середньої кори під Радом-Лисогорським блоком на відстані 530—550 км і глибині 10—15 км. Друге тіло — локальне підняття нижньої кори під блоком Нароль до глибини 23 км на відстані 660—680 км. І нарешті, третє тіло — підняття середньої кори до глибини 12—20 км під Волино-Подільською моноклінальною на відстані 900—970 км. Це може вказувати на наявність високошвидкісних тіл у земній корі в діапазоні глибин 10—35 км. Такі високошвидкісні тіла були достовірно виявлені в земній корі Радом-Лисогорського блока на профілях CEL01 та CEL02 [Malinowski et al., 2005; Środa et al., 2006]. Високошвидкісні тіла, виявлені на глибині 10—35 км, можуть бути алохтонними фрагментами єдиного масиву основних порід або окремими тілами основного складу, що проникли в кору в неопротерозої під час розколу суперконтиненту Родинія, який супроводжувався потужним

рифтогенезом. Прояви рифтогенного магматизму відомі в північно-східній частині Волино-Подільської монокліналі, де на поверхню виходять вендські трапи [Усенко, 2010; Гордиенко и др., 2011].

Посилання на літературу

Zelt, C.A., & Barton, P.J. (1998). Three-dimensional seism in refraction tomography: A comparison of two methods applied to data from the Faeroe Basin. *Journal of Geophysical Research*, 103 (B4), 7187—7210. <https://doi.org/10.1029/97JB03536>.

Grad, M., Guterch, A., Keller, G.R., Janik, T., Hegedüs, E., Vozár, J., Ślaczka, A., Tiira, T., & Yliniemi, J. (2006). Lithospheric structure beneath trans-Carpathian transect from Precambrian platform to Pannonian basin CELEBRATION 2000 seismic profile CEL05. *Journal of Geophysical Research*, 111 (B3), B03301. <https://doi.org/10.1029/2005JB003647>.

Guterch, A., & Grad, M. (2006). Lithospheric structure of the TESZ in Poland based on modern seismic experiments. *Geological Quaternary*, 50(1), 23—32.

Janik, T., Grad, M., Guterch, A., Vozár, J., Bielik, M., Vozárova, A., Hegedüs, E., Kovács, C.S., Kovács, I., Keller, G.R., & CELEBRATION 2000 Working Group. (2011). Crustal structure of the Western Carpathians and Pannonian Basin: seismic models from CELEBRATION 2000 data and geological implications. *Journal of Geodynamics*, 52(2), 97—113. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.12.002>.

Janik, T., Grad, M., Guterch, A., Dadlez, R., Yliniemi, J., Tiira, T., Keller, G. R., Gaczyński, E., & CELEBRATION 2000 Working Group. (2005). Lithospheric structure of the Trans-European Suture Zone along the TTZ & CEL03 seismic profiles (from NW to SE Poland). *Tectonophysics*, 411(1—4), 129—156. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.09.005>.

Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Kovács, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedüs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>.

Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, S., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Okoń, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaeva, O., Gryn, D., Mechie, J., Tolkunov, A., (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians – From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield, *Tectonophysics*, Volume 794, 228620, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228620>.

Malinowski, M., Żelaźniewicz, A., Grad, M., Guterch, A., Janik, T. & CELEBRATION 2000 Working Group. (2005). Seismic and geological structure of the crust in the transition from Baltica to Palaeozoic Europe in SE Poland — CELEBRATION 2000 experiment, profile CEL02. *Tectonophysics*, 401 (1-2), 55—77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.03.011>.

Środa, P., Czuba, W., Grad, M., Guterch, A., Tokarski, A., Janik, T., Rauch, M., Keller, G.R., Hegedüs, E., Vozár, J., & CELEBRATION 2000 Working Group. (2006). Crustal and upper mantle structure of the Western Carpathians from CELEBRATION 2000 profiles CEL01 and CEL04: seismic models and geological implications. *Geophysical Journal International*, 167 (2), 737—760. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03104.x>.

Гордиенко В.В., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н. (2011). Эволюция тектоносферы Волыно-Подольской плиты. *Геофиз. журн.* 33(6), 30—49. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116791>.

Усенко О.В. (2010) Глубинные процессы и магматизм Волыно-Подольской плиты. *Геофиз. журн.* 32 (3), 66—77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117535>.