

Сейсмічний експеримент TTZ-SOUTH¹

*Т. Янік¹, В. Старостенко², П. Александровський^{3, 5}, Т. Єгорова², В. Чуба¹,
П. Срьода¹, Г. Муровська², Х. Заяць⁴, К. Коломієць², Д. Лисинчук²,
Д. Вуйцик¹, Д. Мечі⁶, А. Глушинські⁵, В. Омельченко², О. Легостаєва²,
А. Толкунов⁷, Т. Амашукелі², Д. Гринь², С. Чулков², 2021*

¹Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща

²Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

³Інститут геологічних наук, Вроцлавський університет, Вроцлав, Польща

⁴Західнадрасервіс, Львів, Україна

⁵Польський геологічний інститут, Національний дослідницький інститут,
Варшава, Польща

⁶Німецький дослідницький центр наук про Землю, Потсдам, Німеччина

⁷Державне геофізичне підприємство «Укргеофізика», Київ, Україна

Надійшла 5 січня 2021 р.

Сейсмічний профіль TTZ-South із використанням заломлених та відбитих у закритій зоні хвиль, відпрацьований 2018 р., перетинає південно-західний район України і південно-східний регіон Польщі. Профіль TTZ-South був спрямований на вивчення структури земної кори та верхньої мантії Транс'європейської шовної зони і південно-західного сегмента Східноєвропейського кратону (схилу Українського щита). Профіль завдовжки ~550 км (~230 км у Польщі і ~320 км на заході України) є продовженням раніше реалізованих проектів у Польщі — профілю TTZ (1993 р.) і CEL03 (2000 р.). Глибинне сейсмічне зондування за профілем TTZ-South виконано з використанням 320 сейсмічних станцій TEXAN і DATA-CUBE, що дало змогу отримати сейсмічні записи високої якості з 11 пунктів вибуху (6 — в Україні і 5 — у Польщі). За програмою сейсмічної томографії перших вступів FAST побудовано спрощену *P*-швидкісну модель, що ґрунтується на інверсії часів пробігу перших вступів *P*-хвиль. Отримане зображення демонструє попередню швидкісну модель, яка складається з осадового комплексу і кристалічної кори, що охоплює верхній, середній і нижній її шари. Поверхня поділу Мохо, яку апроксимовано ізолінією 7,5 км/с, розташована на глибині 45—47 км у центральній частині профілю, у північній (Радам-Лисогорський блок у Польщі) і південній (Волино-Подільська монокліналь в Україні) частинах профілю вона піднімається до глибин 40 та 37 км відповідно. Особливістю швидкісного розрізу є наявність високошвидкісних тіл, виявлених у діапазоні глибин 10—35 км. Подібні високошвидкісні тіла раніше були виявлені в корі Радам-Лисогорського блока. Тіла, що залягають на глибині 10—35 км, можуть бути алохтонними фрагментами спочатку 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 у північно-східній частині Волино-Подільської монокліналі, де на поверхню виходять вендські трапи.

Ключові слова: глибинне сейсмічне зондування, сейсмічне моделювання, томографічна інверсія, швидкісна модель.

¹Стаття є перекладом оригіналу статті T. Janik, V. Starostenko, P. Aleksandrowski et al. «TTZ-South seismic experiment», що опублікована англійською мовою в «Геофизическом журнале», 2020, т. 42, № 3, с. 3—15. Стаття публікується повторно в перекладі на українську мову з метою ширшого використання, йдучи на зустріч висловленим потребам численних працівників геолого-геофізичних організацій, які виконують пошуково-розвідувальні роботи, зокрема в Західному регіоні України, де прокладений міжнародний регіональний профіль TTZ-South та інші.

Вступ. Експеримент TTZ-South є найновішим, із застосуванням новітніх систем опрацювання, серед сейсмічних досліджень глибинного сейсмічного зондування (ГСЗ), що виконані у Східній Європі уздовж лінії, орієнтованої з північного заходу на південний схід. У статті наведено результати досліджень із використанням заломлених і відбитих у закритичній зоні заломлених хвиль (WARR) на профілі TTZ-South завдовжки ~550 км, який проходить уздовж південно-західного краю Східноєв-

ропейського кратону (СЕК) на південному сході Польщі та заході України. Попередні два профілі з використанням заломлених і відбитих у закритичній зоні заломлених хвиль уздовж Транс'європейської шовної зони (ТЄШЗ, TTZ) пройдено в Польщі: перший (профіль TTZ) — 1993 р. [Grad et al., 1999], другий (профіль CEL03) — 2000 р. [Janik et al., 2005]. Комбіновані профілі TTZ, CEL03 та TTZ-South відображають розріз літосфери завдовжки 1025 км між Балтійським морем та Молдовою. Профіль

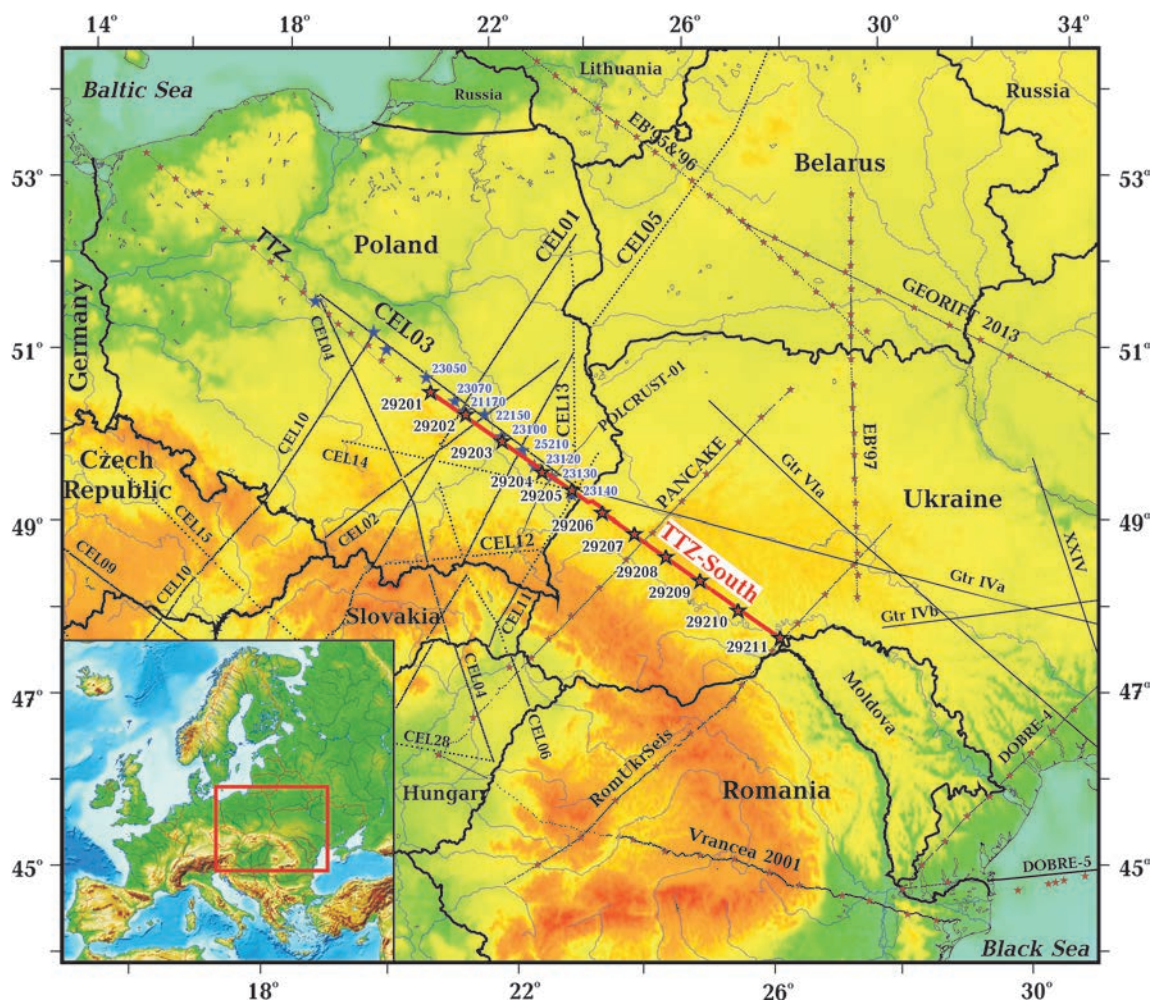


Рис. 1. Розташування профілю TTZ-South (зірочками показані пункти вибуху, а близько розташованими точками — станції запису), профілю CEL03 (зірочками показано пункти вибуху, а точками — станції запису), попередніх профілів WARR (пунктирні лінії) та інших сейсмічних профілів із використанням відбитих хвиль (суцільні чорні лінії) на досліджуваній ділянці.

Fig. 1. Location of the TTZ-South profile (stars represent shot points and closely spaced red dots represent recording stations), CEL03 profile (blue stars represent shot points, black dots represent recording stations) and other previous WARR (dotted lines) and deep reflection (solid black lines) seismic profiles in the study area.

TTZ-South проходить паралельно південно-західному краю СЄК. Через особливості методу заломлених і відбитих у закритичній зоні заломлених хвиль кількість інформації під периферійними частинами профілю (приблизно 100 км на кожному кінці) значно зменшується. Таким чином, структура літосфери на кінцях профілю порівняно слабо визначена. Для поліпшення покриття щільності променів у південно-західній Польщі було виконано перекриття

двох профілів, CEL03 та TTZ-South, приблизно на 200 км. Основна мета цих досліджень із використанням заломлених і відбитих у закритичній зоні заломлених хвиль — визначення структури земної кори та верхньої мантії вздовж лінії Тейссейре—Торнквіста, тобто Транс'європейської шовної зони на південному сході Польщі та заході України (рис. 1).

Дослідження тектонічної будови в межах зчленування СЄК з акреційними те-

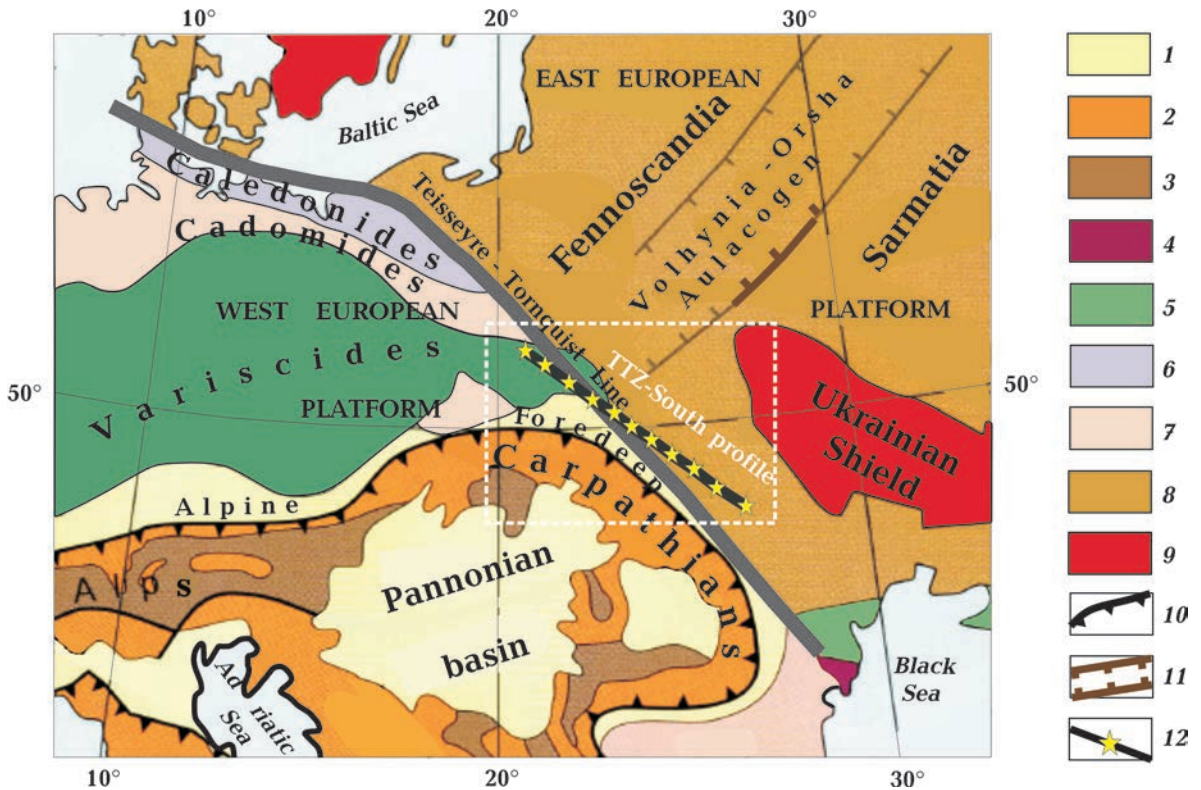


Рис. 2. Розташування профілю TTZ-South на спрощеній тектонічній схемі, побудованій на основі Геологічного атласу Польщі [Nawrocki, Becker, 2017]: 1 — Альпійський прогин та внутрішньогірські басейни; 2 — альпійський складчастий пояс; 3 — герцинські та давніші масиви в межах Альпійського поясу; 4 — кімерійський складчастий пояс; 5 — герцинський складчастий пояс, переважно під пермсько-кайнозойським чохлам; 6 — каледонський складчастий пояс під девон-кайнозойським чохлам; 7 — кадомський (байкальський) фундамент під палеозойсько-кайнозойським чохлам; 8 — архейський і протерозойський кристалічний фундамент під чохлам, від вендського (едіакарського) до кайнозойського часу; 9 — архейський і протерозойський фундамент; 10 — альпійський фронт насуву; 11 — неопротерозойський континентальний рифт (авлакоген); 12 — профіль TTZ-South із пунктами вибуху.

Fig. 2. TTZ-South profile location on tectonic map, simplified after Geological Atlas of Poland [2017]: 1 — Alpine foredeep and intramontane basins, 2 — Alpine fold belt, 3 — Variscan and older massifs within Alpine belt, 4 — Cimmerian fold belt, 5 — Variscan fold belt, mostly under Permian to Cenozoic cover, 6 — Caledonian fold belt, under Devonian to Cenozoic cover, 7 — Cadomian basement, under Palaeozoic to Cenozoic cover, 8 — Archaean and Proterozoic crystalline basement under Vendian/Ediacaran to Cenozoic cover, 9 — exposed Archaean and Proterozoic basement, 10 — Alpine thrust front, 11 — Neoproterozoic continental rift (aulacogen), 12 — TTZ-South profile with shot points.

рейнами Західноєвропейської платформи, переважно палеозойського віку, є надзвичайно важливими для розуміння геодинамічних процесів, що сформували будову літосфери в регіоні. На цьому етапі були попередньо оброблені сейсмічні записи. За вибраним часом пробігу перших вступів здійснено їхню інверсію з метою побудови спрощеної швидкісної моделі за допомогою програми сейсмічної томографії перших вступів FAST (First Arrival Seismic Tomography code) [Zelt, Barton, 1998] із використанням томографічного розв'язання оберненої задачі сейсморозвідки.

Тектонічне положення досліджуваної території. Зона Тейссейре—Торнквіста є фундаментальною тектонічною межею в Європі. Її вперше простежили польський геолог Вавжинець Тейссейре та німецький геолог і палеонтолог Олександр Торнквіст на основі відмінностей осадового покриву та магнітних аномалій Східноєвропейської (СЄП) та Західноєвропейської платформ [Teisseyre, 1893, 1903; Tornquist, 1908, 1910] на початку ХХ ст. На їхню честь ця лінія була названа лінією Тейссейре—Торнквіста (ТТЛ) (див. огляд [Grad, 2019]). Тектонічну карту ділянки з цією нанесеною лінією показано на рис. 2.

Кристалічна кора СЄП складена сильно деформованими і метаморфізованими докембрійськими породами, що прорвані численними магматичними інтрузіями. Натомість консолидована кора, характерна для так званих палеозойських платформ, сформована з гірських порід, які необов'язково є метаморфізованими і містять лише спорадичні магматичні інтрузії [Berthelsen, 1993; Pharaoh, 1996; Dadlez et al., 2005].

Транс'європейська шовна зона вважається широкою смугою деформації (завширшки 100—200 км), що простягається через усю Європу від Британських островів до Чорного моря [Pharaoh, 1996; Pharaoh et al., 2006; Narkiewicz et al., 2015; Grad, 2019; Narkiewicz, Petecki, 2019] (див. рис. 2). ТЄШЗ охоплює ділянку земної кори, яка відокремлює давню частину кратону з докембрійським фундаментом від зон герцинської, кімерійської та альпійської

складчастості [Berthelsen, 1993; Pharaoh, 1996; Winchester et al., 2002; Dadlez et al., 2005].

Південно-західний край земної кори СЄК зазнавав впливу тектонічної і магматичної реактивації внаслідок розширення та рифтогенезу під час неопротерозойського розколу суперконтиненту Родинія (див., наприклад, [Powell et al., 1993; Sliwa et al., 2006; Pease et al., 2008]). Ця подія сформувала океанічну область між Балтикою й Амазонією, яка згодом закрилася під час палеозойських акреційних та орогенних подій. Формування країни Балтики супроводжувалося помітним магматизмом волинської серії. У пізньому рифейі — ранньому венді, під час розколу суперконтиненту Родинія, сформувалася рифтова країна СЄК і розгалужена система авлакогенів, зокрема Волинсько-Оршанський авлакоген. Він утворює зону структурної неоднорідності на межі Сарматії та Фенноскандії. Цей шов між палеопротерозойською корою Фенноскандії і переважно архейською земною корою Сарматії розглядають [Gorbatshev, Bogdanova, 1993; Bogdanova et al., 2001] як ключову межу СЄК.

Профіль TTZ-South орієнтований на вивчення будови та еволюції основних тектонічних одиниць у ТЄШЗ, а також південно-західного сегмента СЄК (див. рис. 2). Він проходить уздовж складної перехідної зони земної кори, яка відокремлює архейсько-палеопротерозойську літосферу СЄК від літосферних тектонічних доменів під час каледонського та герцинського орогенезу з накладеним альпійсько-карпатським орогенезом.

Профіль TTZ-South простягається з північного заходу на південний схід на території Польщі та України. У Польщі він перетинає зону Радом-Краснік та блок Нароль, прилеглі до Лисогорського і Малопольського блоків. Тилові частини згаданих блоків, підняті у південно-східній частині Серединнопольського валу (антиклінорію), складають гори Святого Хреста (Свентокшиські гори). В Україні профіль TTZ-South проходить через Львівський прогин та Волино-Подільську монокліналь південно-

західної окраїни СЕК. Потужний (до 15 км) осадовий чохол зони Радам-Краснік складений відкладами від едіакарію (неопротерозою) до карбону, які разом із південно-західною частиною Люблінського прогину формують герцинську пізньокарбову північно-східну вергенцію складчасто-насувного поясу.

Збір даних. Польовий експеримент TTZ-South був проведений у вересні 2018 р. і охоплював програмування та розгортання станцій сейсмічного запису вздовж профілю, а також бурові й вибухові роботи. Загальна довжина профілю TTZ-South становить приблизно 550 км. Північно-західна частина (~230 км) розташована на території Польщі, а південно-східна — в Україні (~320 км). Проєкт був розроблений для розширення лінії попередніх сейсмічних профілів, проведених на півночі Польщі 1993 р. (профіль TTZ [Grad et al., 1999]) та 2000 р. (профіль CEL03 [Janik et al., 2005]) для вивчення меж СЕК у межах ТТЗ.

Уздовж профілю було здійснено 11 пунктів вибуху: 5 — у Польщі, 6 — в Україні. Найбільші вибухи, зарядом до 1000 кг, здійснено на кінцях профілю. У центральній частині профілю використовували заряди меншої маси (до 400 кг). Пункти вибуху склалися з групи свердловин, пробурених до глибини ~30 м, кожен із зарядом масою 50 кг. Сейсмічні реєстратори із GPS-приймачами використовували для запису часу вибухів. Крім того, поблизу пунктів вибуху були розміщені додаткові станції сейсмічної реєстрації як резервні пристрої вимірювання часу вибуху. Детальна інформація про розташування, час проходження всіх вибухів та інші необхідні параметри наведена в таблиці.

Система спостереження на профілі TTZ-South складалася із 320 мобільних однокомпонентних сейсмічних станцій (110 Reftek-125 TEXAN та 210 DATA-CUBE) з геофонами 4,5 Гц. Сейсмічні сигнали реєстрували із частотою дискретизації 100 Гц. Станції розташовували вздовж профілю на відстані ~1,65 км одна від одної в Польщі та ~1,9 км в Україні. На жаль, не всі самописні пристрої в українській частині профілю

працювали належним чином, що призвело до кількох прогалин у сейсмограмах загальних пунктів вибуху.

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. 3. Вони побудовані для ближніх пунктів вибуху (SP29202 та SP29210) і містять корисні фази хвиль на всій довжині профілю.

Хвильове поле містить вступу заломлених фаз P -хвилі, 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 вступу 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 мантії. Криві, що показують час пробігу згаданих вище фаз заломлених хвиль, є основою для визначення спрощеного розподілу швидкостей у земній корі та верхній мантії.

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

Розташування та параметри пунктів вибуху вздовж профілю TTZ-South, глибина свердловини 30 м

Номер пункту вибуху	Відстань, км	Координати, град		Висота, м	Час UTC, рік:день:год:хв:с	Розмір заряду, кг	Кількість свердловин
		півн. ш.	сх. д.				
SP29201	0,0	51,42682	20,76500	180	2018:253:21:31:54.35	1000	20
SP29202	53,086	51,16452	21,40077	208	2018:253:22:28:22.50	800	16
SP29203	110,269	50,85157	22,04810	229	2018:255:22:27:55.07	700	14
SP29204	174,186	50,48555	22,74625	199	2018:254:22:31:10.79	600	12
SP29205	218,508	50,26772	23,27013	266	2018:255:23:01:08.45	600	12
SP29206	266,532	49,99233	23,78797	338	2018:253:21:00:35.55	400	8
SP29207	315,134	49,73712	24,33733	263	2018:254:21:00:17.89	500	10
SP29208	364,615	49,45562	24,86747	349	2018:253:21:59:55.58	500	10
SP29209	417,522	49,15783	25,43483	300	2018:254:21:59:51.67	500	10
SP29210	478,827	48,78647	26,05512	251	2018:253:23:00:34.37	600	12
SP29211	542,448	48,43600	26,73787	172	2018:253:23:29:59.71	700	14

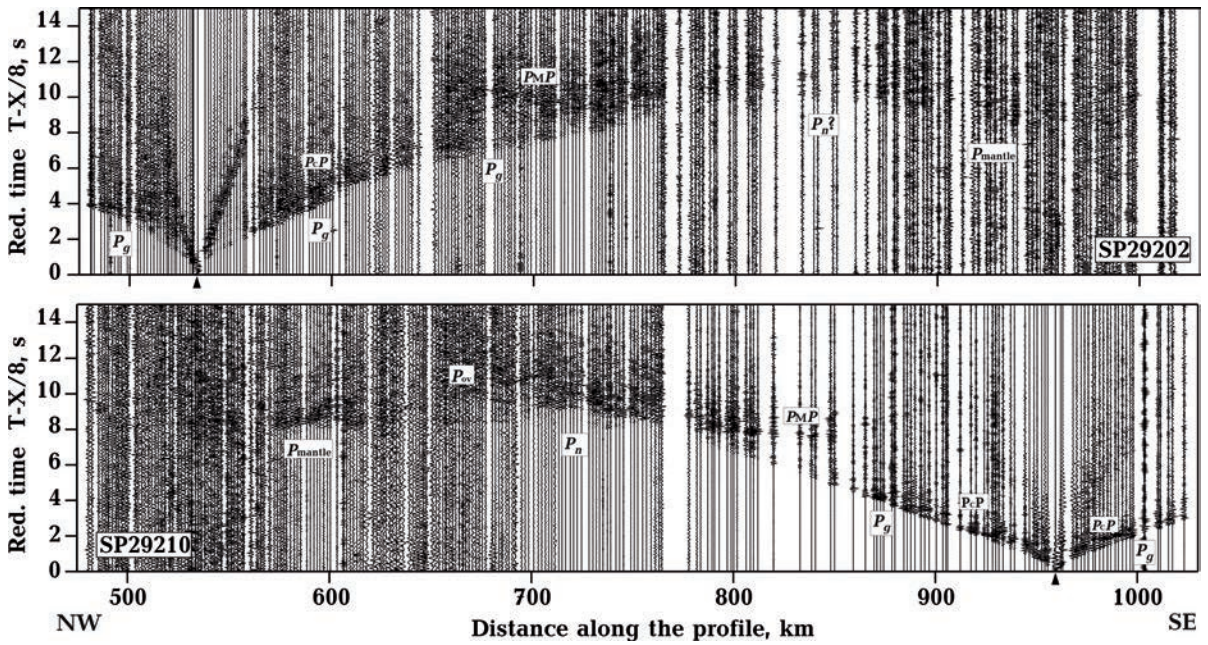


Рис. 3. Амплітудно-нормований сейсмічний розріз вертикальної складової поздовжніх P -хвиль пунктів вибуху SP29202 та SP29210. Швидкість редукції становить 8,0 км/с; P_g — заломлення у верхній та середній кристалічній корі; P_{ov} — закритична фаза хвилі в корі; $P_c P$ — відбиття від межі в середній частині корі; $P_M P$ — 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. 1.

Fig. 3. Trace-normalized, vertical-component P -wave seismic record sections for shot points SP29202 and SP29210. The reduction velocity is 8.0 km/s; P_g — refractions from the upper and middle crystalline crust; P_{ov} — overcritical crustal phases; $P_c P$ — reflections from mid-crustal discontinuities, $P_M P$ — P -waves reflected from the Moho boundary; P_n — refractions from the uppermost mantle, immediately below the Moho; P_{mantle} — P -wave phases from the upper mantle. For location see Fig. 1.

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. 4. 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. 1. Параметризацію швидкості вздовж поперечного розрізу виконували на безперервній прямокутній сітці 401×41 точок з розміром комірок $1,5 \times 1,5$ км. Розмір отриманої моделі становив 600×60 км. Така параметризація моделі не до-

пускає існування стрибків швидкості, за якими визначають геологічні межі або зони розломів. Програма FAST, яка обмежена аналізом лише перших вступів заломлених хвиль, зображує швидкісні межі 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. 4, 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 хі-квадрата (χ^2) — 1,1914.

Алгоритм томографічної інверсії вико-

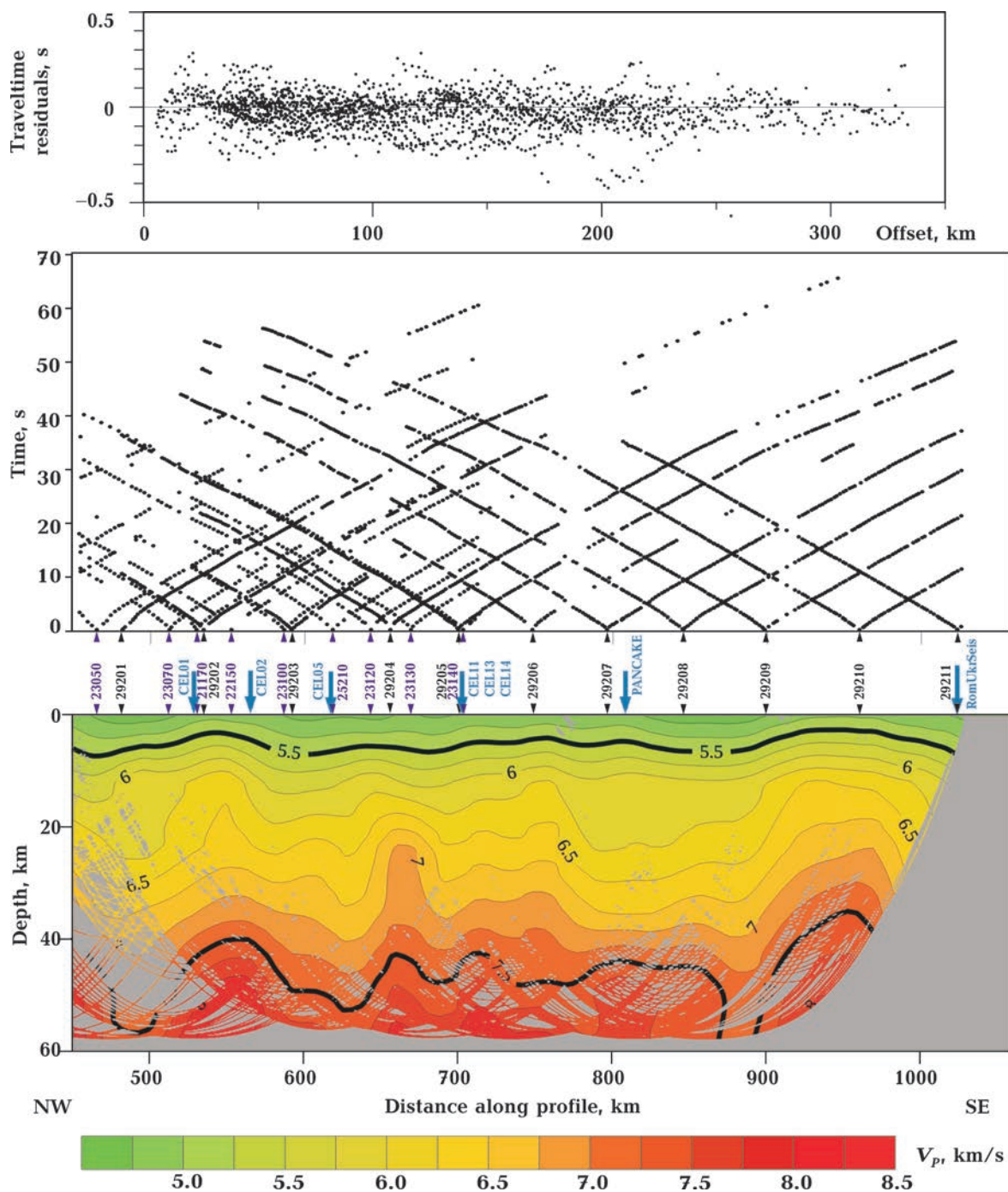


Рис. 4. Нев'язки між спостережуваним та розрахованим часом пробігу (верхня частина рисунка), спостережуваний час пробігу (середня частина рисунка) і швидкісна модель P -хвиль, яка маскує розраховані траєкторії променів і отримана за допомогою томографічної інверсії перших вступів (фази P_g та P_n) із 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.

Fig. 4. Residuals between observed and calculated travel times (upper panel), observed travel times (middle panel) and P -wave velocity model, masked by calculated raypaths, obtained from tomographic inversion of the first arrivals (P_g and P_n phases) using the FAST package (lower panel). The 5.5 km/s and 7.5 km/s velocity isolines are considered to approximately represent the location of the sediment-basement boundary and Moho discontinuity in a model with smooth velocity distribution, respectively. Black triangles mark the shot points on the TTZ-South profile, violet triangles mark the shot points on the CEL03 profile, and blue arrows mark the intersection points between seismic profiles.

ристовує сітку рівномірної швидкості та згладжування без розривів значень швидкостей на межах шарів. Межами в моделі з найбільшими контрастами швидкостей є границя між осадами та фундаментом 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

частинами профілю — польською та українською — розташована на відстані ~700 км уздовж профілю (SP 29205) і приблизно збігається з державним кордоном між Польщею та Україною (див. рис. 1, рис. 5). Будову земної кори польської частини профілю добре вивчають шість профілів WARR, отриманих під час проєкту 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 RomUkr-

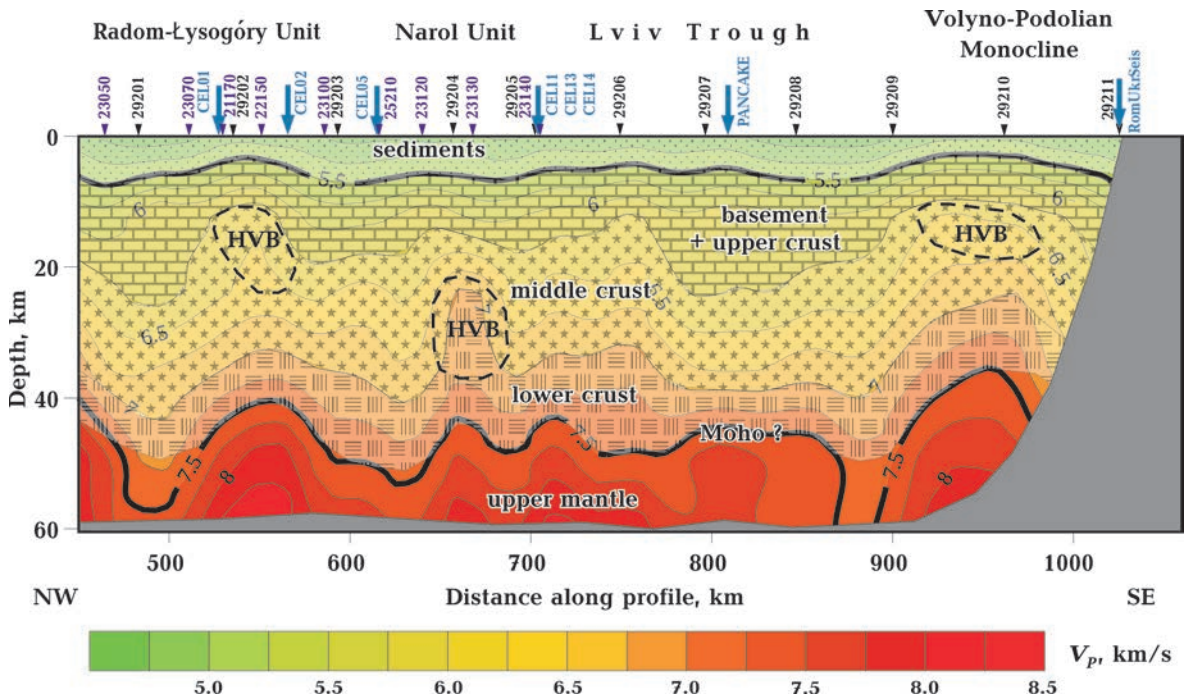


Рис. 5. Попередня інтерпретація моделі будови земної кори за профілем TTZ-South на основі томографічного зображення (див. рис. 4). HVB — високошвидкісне тіло в земній корі. Решту позначень див. на рис. 4.

Fig. 5. Preliminary interpretation model of the crustal structure along the TTZ-South profile based on the tomographic image in Fig. 4. HVB — high-velocity body in the crust. Other symbols as in Fig. 4.

Seis у найбільш південній його частині в межах Волино-Подільської моноклінали. На рис. 5 показана попередня модель будови земної кори вздовж профілю TTZ-South, отримана із зображень сейсмічної томографії.

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 ізоляція 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 (Радам-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 ізоляціями V_p 5,5 та 6,2 км/с, відповідає, найімовірніше, фундаменту (едіакарський період і ранній палеозой) та верхній корі, що піднімаються до ~10 км під південним Радам-Лисогорським блоком і Волино-Подільською монокліналю та заглиблюються до 18 км під блоком Нароль. Найбільші його глибини (22—23 км) передбачаються під Львівським прогином і Радам-Лисогорським блоком на північному кінці профілю.

Характерною особливістю швидкісного зображення сейсмічної томографії є три локальні збільшення ізоляцій швидкості, що показані на рис. 5 у вигляді високошвидкісних тіл (HVB). Перше тіло залягає в покрівлі середньої кори під Радам-Лисогорським блоком на відстані 530—550 км і глибини 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

монокліналю 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 Радам-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 моноклінали, де на поверхню виходять вендські трапи [Усенко, 2010; Гордиенко и др., 2011].

Висновки. Під час вивчення заломлених та відбитих у закритичній зоні заломлених хвиль літосферної структури вздовж профілю TTZ-South отримано високоякісні сейсмічні записи з 11 пунктів вибуху (6 — в Україні, 5 — у Польщі). Ці дані були опрацьовані шляхом аналізу сейсмічних хвиль, а перші їхні вступи були використані в томографічній інтерпретації із застосуванням процедури інверсії в програмі сейсмічної томографії перших вступів FAST.

Отримане томографічне зображення відображає спрощену попередню швидкісну модель будови літосфери перехідної зони між протерозойським Східноєвропейським кратоном та палеозоем Західної Європи на території України та Польщі. Відповідно до розподілу швидкостей, модель складається з осадового комплексу і кристалічної кори, яка охоплює її верхній, середній та нижній шари. Поверхня Мохо розташована на глибині 45—47 км у центральній частині профілю, піднімається до глибини 40 і 37 км у північній (Радам-Лисогорський блок) та південній (Волино-Подільська монокліналь) частинах профілю відповідно. Особливістю швидкісного розрізу є високошвидкісні тіла, виявлені у діапазоні глибин 10—35 км.

Подяки. Профіль TTZ-South було виконано в рамках міжнародної співпраці між

установами та організаціями Польщі (Інститут геофізики Польської академії наук (Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences) і ТОВ «Геофізика Торунь» («Геофізика Toruń» Ltd)) та України (Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України і Державне геофізичне підприємство «Укр-геофізика», Київ). Значна частина устаткування на території України була надана Геофізичним приладовим фондом Німецького дослідницького центру геологічних наук (Geophysical Instrument Pool of the Deutsches GeoForschungsZentrum — GFZ), Потсдам. Участь у польській частині цієї роботи було підтримано в рамках Національ-

ного наукового центру (National Science Centre, Poland), Польща, дослідницький проєкт № 2016/22/M/ST10/00347. Участь в українській частині підтримала Національна академія наук України, дослідницький проєкт № П-6-17-19. Двосторонні контакти були підтримані статутною діяльністю № 3841/E41/S/2016-2019 Міністерства науки та вищої освіти Польщі (Ministry of Science and Higher Education of Poland). Автори щиро вдячні за діяльність багатьох людей, які брали участь у польових дослідженнях та зборі даних. У цій статті використано загальнодоступні пакети GMT [Wessel, Smith, 1995] та Seismic Unix [Cohen, Stockwell, 1997].

Список літератури

- Гордиенко В.В., Завгородня О.В., Логвинов І.М., Тарасов В.Н. (2011). Еволюція тектоносфери Волино-Подольської плити. *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 Волино-Подольской плиты. *Геофиз. журн.* 32(3), 66—77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117535>.
- Berthelsen, A. (1993). Where different geological philosophies meet: the Trans-European Suture Zone. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, A-20* (255), 19—31.
- Bogdanova, S.V., Gorbatshev, R., & Stephenson, R.A. (2001). EUROBRIDGE: Palaeoproterozoic Accretion of Fennoscandia and Sarmatia. *Tectonophysics*, 339(1—2), 1—237. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00030-0).
- Cohen, J.K., & Stockwell, J.W. Jr. (1997). *CWP/SU: Seismic Unix Release 30: a free package for seismic research and processing*. Golden: Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Dadlez, R., Grad, M., & Guterch, A. (2005). Crustal structure below the Polish Basin: Is it composed of proximal terranes derived from Baltica? *Tectonophysics*, 411(1—4), 111—128. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.09.004>.
- Gorbatshev, R., & Bogdanova, S. (1993). Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research*, 64(1—4), 3—21. [https://doi.org/10.1016/03019268\(93\)90066-B](https://doi.org/10.1016/03019268(93)90066-B).
- Grad, M. (2019). Podolian, Saxonian and baltic plates — Teisseyre—Tornquist Line and the edge of the East European Craton. *Geochemistry*, 79(3), 422—433. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.03.002>.
- Grad, M., Janik, T., Yliniemi, J., Guterch, A., Lusto, U., Komminaho, K., Środa, P., Höing, K., Makris, J., & Lund, C-E. (1999). Crustal structure of the Mid Polish Trough beneath TTZ seismic profile. *Tectonophysics*, 314(1—3), 145—160. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00241-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00241-3).
- 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., 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>.
- Janik, T., Grad, M., Guterch, A., & CELEBRATION 2000 Working Group. (2009). Seismic structure of the lithosphere between the East European Craton and the Carpathians from the net of CELEBRATION 2000 profiles in SE Poland. *Geological Quaternary*, 53(1), 141–158.
- Janik, T., Grad, M., Guterch, A., Vozár, J., Bielik, M., Vozárova, A., Hegedűs, 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>.
- 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>.
- Narkiewicz, M., Maksym, A., Malinowski, M., Grad, M., Guterch, A., Petecki, Z., Probulski, J., Janik, T., Majdański, M., Środa, P., Czuba, W., Gaczyński, E., & Jankowski, L. (2015). Transcurrent nature of the Teisseyre—Tornquist Zone in Central Europe: results of the POLCRUST-01 deep reflection seismic profile. *International Journal of Earth Sciences*, 104(3), 775–796. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1116-4>.
- Narkiewicz, M., & Petecki, Z. (2019). Strefa Teisseyre'a—Tornquista — dawne koncepcje a nowe dane. *Przegląd Geologiczny*, 67(10), 837–848. <https://doi.org/10.7306/2019.48>.
- Nawrocki, J., & Becker, A. (Eds.). (2017). *Atlas geologiczny Polski*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny — Państwowy Instytut Badawczy.
- Pharaoh, T.C. (1996). Trans-European Suture Zone: Phanerozoic accretion and evolution of contrasting continental lithospheres. In D.G. Gee, & H.J. Zeyen. *Lithosphere dynamics: origin and evolution of continents* (pp. 41–54). Uppsala: Europrobe secretariate.
- Pharaoh, T.C., Winchester, J.A., Verniers, J., Lassen, A., & Seghedi, A. (2006). The western accretionary margin of the East European Craton: an overview. In D.G. Gee & R.A. Stephenson (Eds.), *European Lithosphere Dynamics* (Vol. 32, pp. 291–311). Geol. Soc., London, Memoirs.
- Pease, V., Daly, J.S., Elming, S.-A., Kumpulainen, R., Moczydłowska, M., Puchkov, V., Roberts, D., Saintot, A., & Stephenson, R. (2008). Baltica in the Cryogenian, 850–630 Ma. *Precambrian Research*, 160(1-2), 46–65. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.015>.
- Powell, C.M., Li, Z.X., McElhinny, M.W., Meert, J.G., & Park, J.K. (1993). Paleomagnetic constraints on timing of the Neoproterozoic breakup of Rodinia and the Cambrian formation of Gondwana. *Geology*, 21(10), 889–892. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021%3C0889:PCOTOT%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021%3C0889:PCOTOT%3E2.3.CO;2).
- Sliaupa, S., Fokin, P., Lazauskiene, J., & Stephenson, R.A. (2006). The Vendian-Early Palaeozoic sedimentary basins of the East European Craton. In D.G. Gee & R.A. Stephenson (Eds.), *European Lithosphere Dynamics* (Vol. 32, pp. 449–462). Geol. Soc., London, Memoirs. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.28>.
- Środa, P., Czuba, W., Grad, M., Guterch, A., Tokarski, A., Janik, T., Rauch, M., Keller, G.R., Hegedűs, 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>.
- 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., Hegedűs, 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>.
- Teisseyre, W. (1893). Całokształt płyty paleozoicznej Podola galicyjskiego. Rzecz o przyszłych wierceniach głębokich na Podolu opolskiem. *Kosmos — Czasopismo Polskiego towarzystwa przyrodników imienia Kopernika*, 18, 319—336.
- Teisseyre, W. (1903). Der paläozoische Horst von Podolien und die ihn umgebenden Senkungsfelder. *Beiträge zur Paläontologie und Geologie Österreich—Ungarns und des Orients*, 15, 101—126.
- Tornquist, A. (1908). Die Feststellung des Südwesttrendes des baltisch—russischen Schildes und die geotektonische Zugehörigkeit der ost-preussischen Scholle. *Schr. Phys.-Ökon. Ges. Königsberg*, 49(1), 1—12.
- Tornquist, A. (1910). *Geologie von Ostpreussen*. Berlin: Verlag von Gebrüder Borntraeger.
- Wessel, P., & Smith, W.H.F. (1995). New version of the Generic Mapping Tools. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 76(33), 329. <https://doi.org/10.1029/95EO00198>.
- Winchester, J.A., Pharaoh, T.C., & Verniers, J. (2002). Paleozoic Amalgamation of Central Europe: an introduction and synthesis of new results from recent geological and geophysical investigations. In J.A. Winchester, T.C. Pharaoh & J. Verniers (Eds.), *Paleozoic Amalgamation of Central Europe* (Vol. 201, pp. 1—18). Geol. Soc. London Spec. Publ.
- Zelt, C.A., & Barton, P.J. (1998). Three-dimensional seismic 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>.

TTZ-SOUTH seismic experiment

T. Janik¹, V. Starostenko², P. Aleksandrowski^{3,5}, T. Yegorova², W. Czuba¹, P. Środa¹, A. Murovskaya², K. Zajats⁴, K. Kolomiyets², D. Lysynchuk², D. Wójcik¹, J. Mechie⁶, A. Głuszyński⁵, V. Omelchenko², O. Legostaeva², A. Tolkunov⁷, T. Amashukeli², D. Gryn², S. Chulkov², 2021

¹Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

²S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

³Institute of Geological Sciences, University of Wrocław, Wrocław, Poland

⁴Zakhidnadra Servis, Lviv, Ukraine

⁵Polish Geological Institute — National Research Institute, Warsaw, Poland

⁶Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, Germany

⁷State Geophysical Enterprise «Ukrgeofizika», Kiev, Ukraine

The wide-angle reflection and refraction (WARR) TTZ-South transect carried out in 2018 crosses the SW region of Ukraine and the SE region of Poland. The TTZ-South profile targeted the structure of the Earth's crust and upper mantle of the Trans-European Suture Zone, as well as the southwestern segment of the East European Craton (slope of the Ukrainian Shield). The ~550 km long profile (~230 km in Poland and ~320 km in western Ukraine) is an extension of previously realized projects in Poland, TTZ (1993) and CEL03 (2000). The deep seismic sounding study along the TTZ-South profile using TEXAN and

DATA-CUBE seismic stations (320 units) made it possible to obtain high-quality seismic records from eleven shot points (six in Ukraine and five in Poland). This paper presents a smooth P wave velocity model based on first-arrival travel-time inversion using the FAST (First Arrival Seismic Tomography) code. The obtained image represents a preliminary velocity model which, according to the P wave velocities, consists of a sedimentary layer and the crystalline crust that could comprise upper, middle and lower crustal layers. The Moho interface, approximated by the 7.5 km/s isoline, is located at 45–47 km depth in the central part of the profile, shallowing to 40 and 37 km depth in the northern (Radom-Łysogóry Unit, Poland) and southern (Volyno-Podolian Monocline, Ukraine) segments of the profile, respectively. A peculiar feature of the velocity cross-section is a number of high-velocity bodies distinguished in the depth range of 10–35 km. Such high-velocity bodies were detected previously in the crust of the Radom-Łysogóry Unit. These bodies, inferred at depths of 10–35 km, could be allochthonous fragments of what was originally a single mafic body or separate mafic bodies intruded into the crust during the break-up of Rodinia in the Neoproterozoic, which was accompanied by considerable rifting. The manifestations of such magmatism are known in the NE part of the Volyno-Podolian Monocline, where the Vendian trap formation occurs at the surface.

Key words: WARR studies, seismic modeling, tomography inversion, velocity model.

References

- Gordienko, V.V., Zavgorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2011). Evolution of the tectonosphere of the Volyn-Podolsk Plate. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(6), 30–49. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116791> (in Russian).
- Usenko, O.V. (2010). Deep processes and magmatic activity of the Volyn-Podolian plate. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(3), 66–77. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i3.2010.117535> (in Russian).
- Berthelsen, A. (1993). Where different geological philosophies meet: the Trans-European Suture Zone. *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, A-20* (255), 19–31.
- Bogdanova, S.V., Gorbatshev, R., & Stephenson, R.A. (2001). EUROBRIDGE: Palaeoproterozoic Accretion of Fennoscandia and Sarmatia. *Tectonophysics*, 339(1–2), 1–237. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00030-0).
- Cohen, J.K., & Stockwell, J.W. Jr. (1997). *CWP/SU: Seismic Unix Release 30: a free package for seismic research and processing*. Golden: Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Dadlez, R., Grad, M., & Guterch, A. (2005). Crustal structure below the Polish Basin: Is it composed of proximal terranes derived from Baltica? *Tectonophysics*, 411(1–4), 111–128. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.09.004>.
- Gorbatshev, R., & Bogdanova, S. (1993). Frontiers in the Baltic Shield. *Precambrian Research*, 64(1–4), 3–21. [https://doi.org/10.1016/03019268\(93\)90066-B](https://doi.org/10.1016/03019268(93)90066-B).
- Grad, M. (2019). Podolian, Saxonian and Baltic plates — Teisseyre—Tornquist Line and the edge of the East European Craton. *Geochemistry*, 79(3), 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.03.002>.
- Grad, M., Janik, T., Yliniemi, J., Guterch, A., Luosto, U., Komminaho, K., Środa, P., Höing, K., Makris, J., & Lund, C-E. (1999). Crustal structure of the Mid Polish Trough beneath TTZ seismic profile. *Tectonophysics*, 314(1–3), 145–160. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00241-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00241-3).
- 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 Quarterly*, 50(1), 23–32.

- 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>.
- Janik, T., Grad, M., Guterch, A., & CELEBRATION 2000 Working Group. (2009). Seismic structure of the lithosphere between the East European Craton and the Carpathians from the net of CELEBRATION 2000 profiles in SE Poland. *Geological Quaternary*, 53(1), 141–158.
- Janik, T., Grad, M., Guterch, A., Vozár, J., Bielik, M., Vozárova, A., Hegedűs, 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>.
- 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>.
- Narkiewicz, M., Maksym, A., Malinowski, M., Grad, M., Guterch, A., Petecki, Z., Probulski, J., Janik, T., Majdański, M., Środa, P., Czuba, W., Gaczyński, E., & Jankowski, L. (2015). Transcurrent nature of the Teisseyre—Tornquist Zone in Central Europe: results of the POLCRUST-01 deep reflection seismic profile. *International Journal of Earth Sciences*, 104(3), 775–796. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1116-4>.
- Narkiewicz, M., & Petecki, Z. (2019). Strefa Teisseyre'a—Tornquista — dawne koncepcje a nowe dane. *Przegląd Geologiczny*, 67(10), 837–848. <https://doi.org/10.7306/2019.48>.
- Nawrocki, J., & Becker, A. (Eds.). (2017). *Atlas geologiczny Polski*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny — Państwowy Instytut Badawczy.
- Pharaoh, T.C. (1996). Trans-European Suture Zone: Phanerozoic accretion and evolution of contrasting continental lithospheres. In D.G. Gee, & H.J. Zeyen. *Lithosphere dynamics: origin and evolution of continents* (pp. 41–54). Uppsala: Europrobe secretariate.
- Pharaoh, T.C., Winchester, J.A., Verniers, J., Lassen, A., & Seghedi, A. (2006). The western accretionary margin of the East European Craton: an overview. In D.G. Gee & R.A. Stephenson (Eds.), *European Lithosphere Dynamics* (Vol. 32, pp. 291–311). Geol. Soc., London, Memoirs.
- Pease, V., Daly, J.S., Elming, S.-A., Kumpulainen, R., Moczydłowska, M., Puchkov, V., Roberts, D., Saintot, A., & Stephenson, R. (2008). Baltica in the Cryogenian, 850–630 Ma. *Precambrian Research*, 160(1-2), 46–65. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.015>.
- Powell, C.M., Li, Z.X., McElhinny, M.W., Meert, J.G., & Park, J.K. (1993). Paleomagnetic constraints on timing of the Neoproterozoic breakup of Rodinia and the Cambrian formation of Gondwana. *Geology*, 21(10), 889–892. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021%3C0889:PCOTOT%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021%3C0889:PCOTOT%3E2.3.CO;2).
- Sliaupa, S., Fokin, P., Lazauskiene, J., & Stephenson, R.A. (2006). The Vendian-Early Palaeozoic sedimentary basins of the East European Craton. In D.G. Gee & R.A. Stephenson (Eds.), *European Lithosphere Dynamics* (Vol. 32, pp. 449–462). Geol. Soc., London, Memoirs. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.28>.
- Środa, P., Czuba, W., Grad, M., Guterch, A., Tokarski, A., Janik, T., Rauch, M., Keller, G.R., Hegedűs, 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>.
- 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., Hegedűs, 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>.
- Teisseyre, W. (1893). Całokształt płyty paleozoicznej Podola galicyjskiego. Rzecz o przeszłych wierceniach głębokich na Podolu opolskiem. *Kosmos — Czasopismo Polskiego towarzystwa przyrodników imienia Kopernika*, 18, 319—336.
- Teisseyre, W. (1903). Der paläozoische Horst von Podolien und die ihn umgebenden Senkungsfelder. *Beiträge zur Paläontologie und Geologie Österreich—Ungarns und des Orients*, 15, 101—126.
- Tornquist, A. (1908). Die Feststellung des Südwesttrendes des baltisch—russischen Schildes und die geotektonische Zugehörigkeit der ost-preussischen Scholle. *Schr. Phys.-Ökon. Ges. Königsberg*, 49(1), 1—12.
- Tornquist, A. (1910). *Geologie von Ostpreussen*. Berlin: Verlag von Gebrüder Borntraeger.
- Wessel, P., & Smith, W.H.F. (1995). New version of the Generic Mapping Tools. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 76(33), 329. <https://doi.org/10.1029/95EO00198>.
- Winchester, J.A., Pharaoh, T.C., & Verniers, J. (2002). Paleozoic Amalgamation of Central Europe: an introduction and synthesis of new results from recent geological and geophysical investigations. In J.A. Winchester, T.C. Pharaoh & J. Verniers (Eds.), *Paleozoic Amalgamation of Central Europe* (Vol. 201, pp. 1—18). Geol. Soc. London Spec. Publ.
- Zelt, C.A., & Barton, P.J. (1998). Three-dimensional seismic 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>.

Сейсмический эксперимент TTZ-SOUTH

**Т. Яник¹, В. Старостенко², П. Александровский^{3,5}, Т. Егорова²,
В. Чуба¹, П. Срьода¹, А. Муровская², К. Заяц⁴, К. Коломиец²,
Д. Лысынчук², Д. Вуйцик¹, Дж. Мечи⁶, А. Глушинский⁵,
В. Омельченко², О. Легостаева², А. Толкунов⁷, Т. Амашукели²,
Д. Гринь², С. Чулков², 2021**

¹Институт геофизики Польской академии наук, Варшава, Польша

²Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

³Институт геологических наук, Вроцлавский университет, Вроцлав, Польша

⁴Западнадрасервис, Львов, Украина

⁵Польский геологический институт, Национальный исследовательский институт, Варшава, Польша

⁶Немецкий исследовательский центр наук о Земле, Потсдам, Германия

⁷Государственное геофизическое предприятие «Укргеофизика», Киев, Украина

Сейсмический профиль TTZ-South с использованием преломленных и отраженных в закритической зоне волн, отработанный в 2018 г., пересекает юго-западный район Украины и юго-восточный регион Польши. Профиль TTZ-South пройден с целью изучения структуры земной коры и верхней мантии Трансъевропейской шовной зоны и юго-западного сегмента Восточно-

Европейского кратона (склона Украинского щита). Длина профиля ~550 км (~230 км в Польше и ~320 км на западе Украины), он является продолжением ранее реализованных проектов в Польше — в 1993 г. профиля TTZ и в 2000 г. — CEL03. Глубинное сейсмическое зондирование по профилю TTZ-South, выполненное с использованием 320 сейсмических станций TEXAN и DATA-CUBE, позволило получить сейсмические записи высокого качества из 11 пунктов взрыва (6 — в Украине и 5 — в Польше). Представлена упрощенная *P*-скоростная модель, базирующаяся на инверсии времен пробега первых вступлений *P*-волн и построенная с использованием программы сейсмической томографии первых вступлений FAST. Полученное изображение демонстрирует предварительную скоростную модель, которая состоит из осадочного комплекса и кристаллической коры, включая верхний, средний и нижний ее слои. Поверхность раздела Мохо, аппроксимируемая изолинией 7,5 км/с, расположена на глубине 45—47 км в центральной части профиля, в северной (Радом-Лысогорский блок в Польше) и южной (Волыно-Подольская моноклинал в Украине) частях профиля поднимается до глубины 40 и 37 км соответственно. Особенность скоростного разреза — наличие высокоскоростных тел, выявленных в диапазоне глубин 10—35 км. Подобные высокоскоростные тела ранее были обнаружены в коре Радом-Лысогорского блока. Тела, залегающие на глубине 10—35 км, могут быть аллохтонными фрагментами сначала единого массива основных пород или отдельными телами основного состава, проникшими в кору в неопротерозое во время раскола суперконтинента Родиния, который сопровождался мощным рифтогенезом. Проявления рифтогенного магматизма известны в северо-восточной части Волыно-Подольской моноклинали, где на поверхность выходят вендские траппы.

Ключевые слова: глубинное сейсмическое зондирование, сейсмическое моделирование, томографическая инверсия, скоростная модель.