

Про можливу природу глибинних магнітних джерел зони Тейссейре—Торнквіста у зв'язку з неоднорідністю літосфери

І.К. Пашкевич, М.І. Бакаржієва, 2025

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

Необхідною умовою для формування джерел магнітних аномалій є наявність зон розтягу кристалічної кори та підвищена проникність мантиї. Найбільша концентрація джерел спостерігається в регіоні, обмеженому меридіональними глибинними зонами активізації. Він характеризується підвищеною проникністю літосфери, «розмитістю» головної геодинамічної межі та порушенням структури перехідного шару під зоною Тейссейре—Торнквіста (ТТЗ). Утворення магнітних джерел за цих сприятливих умов пов'язується з магматизмом і флюїдизацією літосфери в процесі субдукції. Її ознаками є високошвидкісні похилі на південний захід шари в мантиї до глибини 500—600 км, ідентифіковані як слеби, та «шари-дублікати» в перехідному шарі, що інтерпретуються як «потоплені» слеби.

Ключові слова: 3D магнітне моделювання, неоднорідність літосфери, лінія Тейссейре—Торнквіста, Східноєвропейський кратон.

Вступ. Попередні дослідження показали, що розподіл глибинних магнітних джерел кристалічної кори, що супроводжують лінію Тейссейре—Торнквіста (ТТЛ) з боку Східноєвропейського кратону (СЕК), пов'язаний з будовою та розвитком північно-західної та південно-східної гілок ТТЛ. Фенноскандинавський та Сарматський сегменти СЕК, обмежені з південного заходу цими гілками, мають різний характер магнітних джерел та інтенсивність їх намагніченості. Магнітні аномалії обумовлені основними та ультраосновними магматичними породами або зонами збагачення магнітними мінералами, тому природу їх джерел в обох випадках пов'язують з глибинними процесами та неоднорідностями літосфери. Особливу роль при цьому відіграє процес субдукції, який дискутується для даного регіону протягом кількох десятиліть.

Завданням цього дослідження є встановлення зв'язку корових і мантийних структур з погляду обумовленості ними магнітної неоднорідності літосфери.

Об'єкт і методи дослідження. Кристалічна кора південно-західного околу СЕК і палеозойських доменів, що оточують її, складена потужною тришаровою корою кратону і малопотужною двошаровою корою Західноєвропейської платформи (ЗЄП). Високошвидкісна стабільна мантия СЕК зчленовується з низькошвидкісною активізованою мантиєю ЗЄП. Літосфера відзначається різкою зміною поведінки її межі з астеносферою. Потужність літосфери збільшується за різними оцінками від ~80 км під ЗЄП і до ~200 км під СЕК. Характер зчленування різних типів мантиї остаточно не зрозумілий через різні методичні підходи до побудови схем рельєфу межі літосфери та астеносфери (МЛА).

Citation: Pashkevich, I.K., & Bakarzhieva, M.I. (2025). On the possible nature of deep magnetic sources of the Teisseyre-Thornquist Zone in connection with the heterogeneity of the lithosphere. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 290—295. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322562>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

З метою з'ясування зв'язку корових і мантієвих структур (з використанням матеріалів сейсмотомографії [Цветкова и др., 2021; Гінтов та ін., 2022 та посилання в ній] і люб'язно наданих Т.О. Цветковою вертикальних меридіональних швидкісних перетинів) була побудована схема неоднорідностей підкорової мантії регіону. Для визначення південно-західної межі високошвидкісної мантії СЕК використано нульові лінії нев'язок V_p горизонтальних швидкісних зрізів на глибинах 50 і 100 км. За цими перетинами оцінено потужності СЕК і мантії ЗЄП у межах ТТЛ, виділені високошвидкісні похилі шари в мантії, що ототожнюються зі следами, з урахуванням надглибинних мантієвих флюїдів. За вертикальними швидкісними перетинами оцінено зони поширення перехідного шару від верхньої до середньої мантії під СЕК і ЗЄП і схарактеризовано його будову під ТТЛ.

Результати та їх обговорення. Мантія СЕК і ЗЄП у непорушених зонах має максимальну потужність, що сягає 300 км. У безпосередній близькості до ТТЛ структура літосфери порушується, і потужність обох типів мантії скорочуються до 100—150 км. Поведінка межі мантії СЕК і ЗЄП на глибинах 50 і 100 км та їх «усереднений» генералізований варіант засвідчують про наявність насуву мантії СЕК на мантію ЗЄП. Зона насуву у генералізованому варіанті субпаралельна ТТЛ і розміщується під зоною підсуву нижньої кори СЕК під кору ЗЄП. Відхилення зони насуву від субпаралельного розташування ТТЛ відбувається на південному сході за глибинною меридіональною Українсько-Прибалтійською зоною активізації. Вона зафіксована в усьому розрізі верхньої мантії, включаючи перехідний шар. По цій зоні мантієвий насув зміщується на південь, де набуває широтного простягання.

Аналіз поведінки перехідного шару показав тісний зв'язок корових і мантієвих структур. Перехідний шар СЕК характеризується зниженими значеннями V_p , тоді як у ЗЄП він високошвидкісний. Різка границя цих типів шарів у межах Фенноскандії

знаходиться на північ від ТТЛ у регіоні, обмеженому Свеко-Норвезьким фронтом та Українсько-Прибалтійською зоною активізації. Отже, мантія під СЕК підстилається тут перехідним шаром ЗЄП. Зазначимо, що у цьому регіоні сконцентровані глибинні магнітні джерела, зокрема супутні ТТЛ. У домені, обмеженому зонами Тор—Торнквіст та Зоргенфрей—Торнквіст, розвинений також високошвидкісний перехідний шар, проте істотно стоншений.

На південний схід від Українсько-Прибалтійської зони активізації у Сарматії межа перехідних шарів СЕК і ЗЄП різка та перебуває на вертикальному продовженні ТТЛ. В інших випадках під ТТЛ виявлені ускладнення структури перехідного шару, часто за участю високошвидкісних похиліх шарів. У перехідному шарі ЗЄП фіксується двошарова його будова у вигляді «шарів дублікатів». Їх інтерпретовано як «потоплені» следи. Співвідношення корових і мантієвих структур демонструють магнітна модель і розріз літосфери за сейсмічним профілем Р4 (рис. 1). Мантієвий насув і підсув нижньої кори СЕК під кору ЗЄП можна пояснити загальним процесом їх формування зі спрямуванням динамічних напружень з північного сходу на південний захід. При цьому магнітні глибинні джерела розміщуються в зоні розтягу. Дані щодо МЛА [Mazur et al., 2015] вказують на кореляцію корових і мантієвих структур. Показовими є також найбільші зміни глибини до МЛА під зоною нижньої кори СЕК, підсунутої під кору ЗЄП. Зазначимо тісний зв'язок супутникового поля із потужністю літосфери. З глибинними літосферними процесами та поведінкою МЛА пов'язане також потрійне зчленування шовної зони Фенноскандія—Сарматія (ФСЗ) із гілками ТТЛ. Так, згідно з однією з моделей глибин залягання МЛА [Majorowicz et al., 2019], під зоною ФСЗ маємо локальне лінійне піднімання цієї межі з 200 до 150 км. Підтвердженням мантієного походження головних тектонічних елементів регіону можуть слугувати наявність кількох впевнено простежених у швидкісних вертикальних перетинах похилих високошвид-

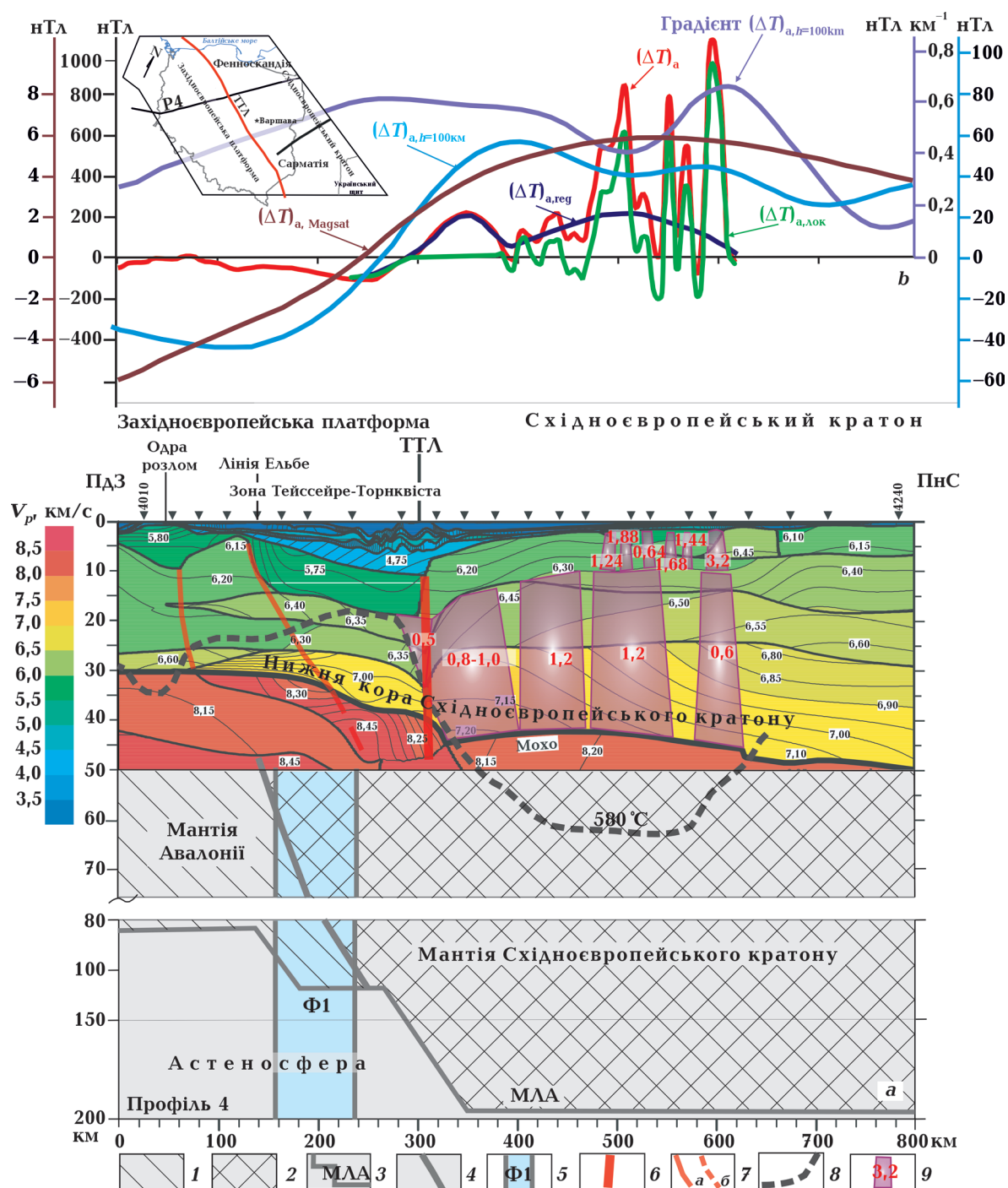


Рис. 1. Магнітна модель земної кори за сейсмічним профілем Р4 і рельєф границі літосфери та астеносфери (МЛА) (а) і за графіками аномального магнітного поля (б): 1 — низькошвидкісна підкорова мантия ЗЄП; 2 — високошвидкісна підкорова мантия СЄК; 3 — межа літосфери та астеносфери (МЛА); 4 — межа високошвидкісної та низькошвидкісної підкорових мантий на глибинах від 50 до 100 км; 5 — надглибинний мантийний флюїд Ф1; 6 — лінія Тейссейре—Торнквіста (ТТЛ); 7 — головні розломи (а) та їх можливе продовження (б); 8 — ізотерма Кюрі магнетиту; 9 — магнітні джерела, значення намагніченості, в А/м. Графіки аномального магнітного поля: аномального $(\Delta T)_a$, регіонального $(\Delta T)_{a, \text{reg}}$, локального $(\Delta T)_{a, \text{лок}}$, аномального магнітного поля на висоті 100 км $(\Delta T)_a, h=100\text{km}$, поля повного градієнта на висоті 100 км, градієнт $(\Delta T)_a, h=100\text{km}$ і супутникового поля Magsat $(\Delta T)_a, \text{Magsat}$.

Fig. 1. Magnetic model of the Earth's crust based on the P4 seismic profile and the relief of the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) (a), graphs of the anomalous magnetic field (b): 1 — low-velocity subcrustal mantle of the East European Craton; 2 — high-velocity subcrustal mantle of the West European Platform; 3 — LAB; 4 — LAB; 5 — deep mantle flow F1; 6 — Tethyan-Tornquist Zone (ТТЛ); 7 — main faults (a) and their possible continuation (b); 8 — Curie isotherm of magnetite; 9 — magnetic sources, values of magnetization, in A/m.

the WEP; 2 — high-velocity subcrustal mantle of the EEC; 3 — lithosphere-asthenosphere boundary (LAB); 4 — boundary of high-velocity and low-velocity subcrustal mantles at depths from 50 to 100 km; 5 — superdeep mantle fluid f1; 6 — Teisseyre-Tornquist line (TTL); 7 — Main: faults (a) and their possible continuations (b); 8 — Curie isotherm of magnetite; 9 — magnetic sources, values of magnetization in A/m. Graphs of anomalous magnetic field: anomalous (ΔT_a), regional ($\Delta T_{a,reg}$), local ($\Delta T_{a,loc}$), anomalous magnetic field at 100 km height (ΔT_a , $h=100$ km, full gradient field at 100 km height (ΔT_a , $h=100$ km and satellite field Magsat (ΔT_a , Magsat.

кісних шарів на глибинах від 100—200 до 400—500 км. Їхні простягання та напрямок падіння слідує простягання і падінню TTL і ФСЗ. Оцінювання заглиблення TTL у мантию утруднено, через переважно похиле на південний захід положення TTL у корі та вертикальну межу швидкісних неоднорідностей до глибин 500—600 км під положенням TTL на поверхні кристалічної кори. Можливо, що цю суперечність можна пояснювати існуванням підкорового насуву мантиї СЕК на мантию ЗЄП.

Одним із головних питань формування ТТЗ є питання про існування та роль субдукційних процесів. Воно стосується і можливості зв'язку з ним магнітних мантийних джерел. На прикладі активних вулканічних дуг показано, що мантийні магнітні джерела пов'язані зі специфічними холодними регіонами (давніми кратонами і субдукуючими следами) та із зонами гідратизованої та окисненої мантиї. Субдукційний процес також забезпечує геохімічну та геодинамічну обстановку для збагачення оксидами заліза кори та мантиї. Такі магнітні джерела фіксуються позитивними супутниковими аномаліями. За 3D моделюванням цих аномалій деякими дослідниками отримано широкий спектр намагніченості джерел. Наприклад, якщо потужність слібу 7 км і діапазон глибин 25—250 км, то намагніченість оцінюють у 4 А/м, а магнітну сприйнятливість Тихоокеанської плити — у $13 \cdot 10^{-3}$ од. СІ.

Роль субдукційних процесів у розвитку ТТЗ є невизначеною. Це пов'язане з неоднозначністю виділення високошвидкісних похилих мантийних шарів за даними сейсмотомографії. Такі шари ідентифікуються як сліби [Старостенко та ін., 2024]. Найбільш імовірною моделю формування ТТЗ є південно-західна ордовик-силурійська модель субдукції

[Гінтов та ін., 2022]. Якщо така існувала, то безпосередньо для магнітного моделювання вона не може бути використана з двох причин. По-перше, за час з ордовіку—силуру сліб, що занурювався, дійшов би температурної рівноваги з навколишнім середовищем. По-друге, при оцінених потужностях слібу (100—250 км) і глибинах (250—400 км) над ним має існувати інтенсивний максимум супутникового поля на південний захід від TTL. Однак тут зафіксований відомий Центральноєвропейський мінімум. Тому мантийне джерело може обумовлювати супутниковий максимум над Фенноскандією. Для виникнення магнітних джерел уздовж ТТЗ важливе існування зон розтягу, пов'язаних з колізійним процесом, і сприятливих умов для привнесення флюїдами оксидів заліза над зоною субдукції.

Глибинні магнітні джерела супроводжують TTL практично на всьому контакті з Фенноскандією. Вони мають дайкоподібну форму і обмежені з південного заходу TTL. Наявність Трансскандинавського вулканічного поясу може засвідчувати наявність глибинного магматичного осередку та зв'язку з ним корових магнітних джерел. Проте укоріненню інтрузій сприяло розуцільнення кори на північний схід від TTL, зафіксоване на кількох сейсмічних профілях зниженням швидкості V_p . Крім того, за даними сейсмотомографії зона ТТЗ характеризується порушеною структурою та стоншенням перехідного шару, підвищеною проникністю літосфери та «розмитістю» її головної геодинамічної межі. Ця обставина сприяє надходженню флюїдів з великих глибин і формуванню новостворених магнітних мінералів. З цього погляду важливу роль можуть відіграти виявлені надглибинні флюїди. Зокрема, магнітне глибинне джерело в межах Львівського

прогину повністю розташоване в межах такого флюїду [Цветкова и др., 2021].

Висновки. 1. Найбільша концентрація глибинних магнітних джерел, спостерігається в регіоні, обмеженому меридіональними глибинними зонами активзації — Свеко-Норвезькою та Українсько-Прибалтійською. Вони простежені в усьому розрізі літосфери до перехідного шару верхньої мантії.

2. Цей регіон характеризується неоднорідністю мантії починаючи з підкорових глибин. До глибини 100 км високошвидкісна мантія СЄК насунута на низькошвидкісну мантію ЗЄП. Зона насуву простежена на південний захід від ТТЛ, її генеральне простягання згідне з ТТЛ. Мантієвий насув корелює з підсувом нижньої кори СЄК під кору ЗЄП і, ймовірно, пов'язаний з ним загальним процесом руху літосфери у південно-західному напрямку з утворенням зони розтягу на північному сході від ТТЛ.

3. Магнітні джерела, що супроводжують ТТЛ з північного сходу, є більш молодими у порівнянні з джерелами СЄК, оскільки

мають з останніми торцеве зчленування. Їх утворення пов'язується із субдукційним процесом в ордовіку—силурі. Його ознаками є високошвидкісні похилі на південний захід шари в мантії до глибини 500—600 км, ідентифіковані як слеби, та поширені на південний захід від ТТЛ «шари-дублікати» в перехідному шарі, що інтерпретуються як «потоплені» слеби.

4. Існування зон розтягу вздовж ТТЛ створює сприятливі умови для укорінення інтрузій — джерел магнітних аномалій вздовж ТТЛ. Крім того, визначено підвищену проникність літосфери, «розмитість» головної геодинамічної межі та порушення структури стоншеного перехідного шару під ТТЗ, що сприяє проникненню в зону ТТЗ глибинних флюїдів із утворенням нових «вторинних», мінералів.

Таким чином, природа глибинних магнітних джерел цілком обґрунтовано сприймається як двояка. Їх намагніченість можна пов'язувати з первинними магнітними мінералами основних—ультраосновних порід і з новоутвореними оксидами заліза, привнесеними глибинними флюїдами.

Список літератури

- Гінтов О.Б., Цветкова Т.О., Бугаєнко І.В., Заєць Л.М., Муровська Г.В. Глибинна будова Транс'європейської шовної зони (за матеріалами сейсмотомографії та ГСЗ) і деякі уявлення про її розвиток. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 6. С. 63—87. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273640>.
- Старостенко В.І., Гінтов О.Б., Муровська Г.В., Мичак С.В., Лисинчук Д.В. Тектоніка і глибинна будова південно-західної частини Східноєвропейського кратону в межах України. Ч. II. *Геофиз. журн.* 2024. Т. 46. № 5. С. 3—31. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287>.
- Цветкова Т.А., Бугаєнко І.В., Заєць Л.Н. Ско-
ростное строение мантии пограничья Вос-
точно-Европейской и Западно-Европейской платформ. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 5. С. 181—192. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244080>.
- Majorowicz, J., Polkowski, M., & Grad, M. (2019). Thermal properties of the crust and the lithosphere-asthenosphere boundary in the area of Poland from the heat flow variability and seismic data. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 649—672. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-01673-8>.
- Mazur, S., Mikolajczak, M., Krzywiec, P., Malinowski, M., Buffenmyer, V., & Lewandowski, M. (2015). Is the Teisseyre-Tornquist Zone an ancient plate boundary of Baltica. *Tectonics*, 34, 2465—2477. <https://doi.org/10.1002/2015TC003934>.

On the possible nature of deep magnetic sources of the Teisseyre-Thornquist Zone in connection with the heterogeneity of the lithosphere

I.K. Pashkevich, M.I. Bakarzhieva, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A prerequisite for the formation of magnetic anomaly sources is the presence of crystal crustal stretching zones and increased mantle permeability. The highest concentration of sources is observed in the region bounded by meridional deep activation zones. It is characterised by increased permeability of the lithosphere, 'blurring' of the main geodynamic boundary and disruption of the structure of the transition layer under the Teisseyre-Thornquist zone (TTZ). The formation of magnetic sources under these favourable conditions is associated with lithospheric magmatism and fluidisation in the process of subduction. Its features are high-velocity southwest-dipping layers in the mantle to a depth of 500–600 km, identified as slabs, and 'duplicate layers' in the transition layer interpreted as 'sunken' slabs.

Key words: 3D magnetic modelling, lithosphere heterogeneity, Teisseyre-Thornquist line, East European Craton.

References

- Gintov, O.B., Tsvetkova, T.O., Bugaenko, I.V., Zayats, L.M., & Murovska, G.V. (2022). The deep structure of the Trans-European Suture Zone (based on seismic survey and GSR data) and some insights in to its development. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(6), 63–87. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273640> (in Ukrainian).
- Starostenko, V.I., Gintov, O.B., Murovska, H.V., Mychak, S.V., & Lysynchuk, D.V. (2024). Tectonics and deep structure of the south western part of the East European Platform within Ukraine. P. II *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(5), 3–31. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287> (in Ukrainian).
- Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Zaets, L.N. (2021). Speed structure of the mantle at the border of the East European and West European platforms. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(5), 181–192. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i5.244080> (in Russian).
- Majorowicz, J., Polkowski, M., & Grad, M. (2019). Thermal properties of the crust and the lithosphere–asthenosphere boundary in the area of Poland from the heat flow variability and seismic data. *International Journal of Earth Sciences*, 108, 649–672. <https://doi.org/10.1007/s00531-018-01673-8>.
- Mazur, S., Mikolajczak, M., Krzywiec, P., Malinowski, M., Buffenmyer, V., & Lewandowski, M. (2015). Is the Teisseyre-Thornquist Zone an ancient plate boundary of Baltica. *Tectonics*, 34, 2465–2477. <https://doi.org/10.1002/2015TC003934>.