

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.3.337701>

УДК 551.24/550.341.334 (477)

Геофізичне вивчення геодинаміки України у ранньому докембрії на засадах плюмової та плитової тектоніки

E-mail: vstar@igph.kiev.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-7960-0011>;
oleg.gintov@gmail.com,
<https://orcid.org/00000002-0974-129X>

Received / Надійшла до редакції:
05.05.2025

Received in revised form /
Надійшла у ревізованій формі:
07.08.2025

Accepted / Прийнята:
05.09.2025

*Corresponding author /
Автор для кореспонденції:
O.B. Gintov, oleg.gintov@gmail.com

Keywords: Ukraine, geodynamics,
geophysics, Earth's crust, mantle, Early
Precambrian.

Ключові слова: Україна, геодинаміка,
геофізика, земна кора, мантія, ранній
докембрій.

В.І. Старостенко, О.Б. Гінтов*

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

Geophysical study of the geodynamics of Ukraine in the Early Precambrian on the basis of plume and plate tectonics

V.I. Starostenko, O.B. Gintov*

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article reviews the geological and geophysical findings with crucial implications for selected problems of the geodynamics of the Earth's crust and mantle of Ukraine. Geological and tectonic studies established subhorizontal movements along the faults and fields of horizontal stresses encompassing the crust in all regions of Ukraine. Together with the paleomagnetic data it showed that the Sarmatian Microcontinent was turned counterclockwise during the collision with Fennoscandia. Seismotomography proved the existence of subducting slabs sinking down to the lows of the upper mantle and into the lower mantle. The data indicate that starting in the Neoproterozoic, the Ukrainian Shield (USH) developed according to the mechanisms of plate-plume tectonics. As for the earlier periods, it was shown that the thermal alteration of the USH's Early-Precambrian rocks occurred later, in the Paleoproterozoic; yet it was influenced by the plume processes. The article clarifies the age sequence of the geodynamical processes in the USH Early Precambrian. In particular, the Eoarchean complexes of USH belonged, at the time of their origin, to different continents or microcontinents and had never been a single whole body. The Paleoproterozoic tonalite-trondhjemite-granodiorite complex is a base for the Pryazovia greenstone structures such as Sorokyne, Kosivtseve, and others. From the geodynamic point of view, the same criteria can be applied to the clarified origin of USH Paleoproterozoic rocks as to the Eoarchean. The USH Mesoarchean greenstone complex (GSC) is one of the oldest GSC on Earth. The USH GSC's lows are most probably metamorphosed oceanic crust overlaying the continental crust gneisses; thus, subduction processes had to be possible as early as in Mesoarchean, despite the lack of supporting geophysical data. In the Neoproterozoic, the Western and Eastern Microplates of the Shield began to grow closer, and the oceans between them diminished. At the start of Proterozoic, USH megablocks were still terranes. They developed independently of each other. The Shield started to consolidate, and the Sarmatian Microcontinent started to emerge between 2.5 and 2.0 Ga. The end of the Paleoproterozoic was distinguished by one of the most powerful episodes of granitoid magmatism on the whole Shield. Fennoscandia subducted under Sarmatia, and USH was fully consolidated. The process coincides with the sialic crust consolidation processes on most continents of the world.

© Видавець Інститут геологічних наук
НАН України, 2025. Стаття опублікована за
умовами відкритого доступу за ліцензією
CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences
of the National Academy of Sciences of
Ukraine, 2025. This is an Open Access article
under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Цитування: Старостенко В.І., Гінтов О.Б. Геофізичне вивчення геодинаміки України у ранньому докембрії на засадах плюмової та плитової тектоніки. *Геологічний журнал*. 2025. № 3 (392). С. 3–15. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.3.337701>

Citation: Starostenko V.I., Gintov O.B. 2025. Geophysical study of the geodynamics of Ukraine in the Early Precambrian on the basis of plume and plate tectonics. *Geologichnij zhurnal*, 3 (392), 3–15. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.3.337701>

Вступ

Автори хочуть відмітити, що хоча стаття й призначена висвітлити роль вітчизняної геофізики в просуванні ідей плитово-плюмової тектоніки в Україні, першопрохідцями цього напрямку в нашій країні вважають видатних українських геологів Б.Л. Лічкова, В.Г. Бондарчука, О.І. Слензака, Г.І. Каляєва, Є.Б. Глеваського, В.Г. Пастухова, Є.І. Паталаху. Б.Л. Лічков першим ввів поняття тектонічних рухів у докембрії України (Лічков, 1925), визнавав і розвивав погляди А. Вегенера (Лічков, 1935). В.Г. Бондарчук показав, що в основі геологічної будови території України лежить розломно-блокова, а не складчасто-хвильова структура кристалічного фундаменту та всієї твердої літосфери (Бондарчук, 1946). О.І. Слензак першим встановив вертикальношарувату структуру Українського щита (УЩ) (Слензак, 1965), а Г.І. Каляєв (Каляев, 1976), мабуть, першим у світі змалював плитотектонічні процеси в докембрії на прикладі УЩ. В.Г. Пастухов та Є.Б. Глеваський з дещо різних позицій розвинули далі погляди Г.І. Каляєва (Геодинамическая..., 1993; Глевасский, Каляев, 1998), а Є.І. Паталаха з колегами – фізиками та математиками – створив науковий напрям з геодинамічного чисельного моделювання геологічних структур як основи прогнозу нафтогазових родовищ (Паталаха, Гончар, 2003; Паталаха и др., 2004).

На жаль, цих першопрохідців вже немає, і не можна сказати, що вони мали дуже велику підтримку серед основної маси наших геологів. Це видно з виданих вже в цьому столітті геологічних карт, в пояснювальних записках до яких іноді трапляються посилання на модну геодинамічну термінологію, але все одно карти склалися і перескладалися за старими канонами, де геодинамічного та й навіть сучасного тектонічного навантаження практично немає. До того ж, геологічні моделі плитотектонічних процесів кристалічного фундаменту УЩ будувалися першопрохідцями (крім Є.І. Паталахи та його колег) на принципі зіставлення палеогеодинамічних обстановок докембрію та фанерозою, які виражалися в речовинних, структурних, металогенічних «полярностях». Цим моделям не вистачало кінематичної та глибинної складових, які можуть бути отримані лише на основі геофізичних, у тому числі тектонофізичних матеріалів.

Геофізики (С.І. Субботін, А.В. Чекунов, В.Б. Соллогуб, К.Ф. Тяпкін, автори цієї статті, В.С. Гейко з колегами та багато інших), підключившись до

геодинамічних досліджень території України з 1960-х – 1970-х років, одразу розширили методичну базу цих робіт, додавши до них глибинне сейсмічне зондування (ГСЗ), сейсмотомографію, тектонофізику та всі інші загальновідомі геофізичні методи. С.І. Субботін (Субботин, 1975) звернув увагу на горизонтальні переміщення земної кори вздовж глибинних розломів і пояснив їх виникненням значних сил, що викликані гвинтовими рухами мантійних неоднорідностей. А.В. Чекунов і В.Б. Соллогуб встановили геолого-геофізичні ознаки глибинних розломів на території України, їх велику протяжність і ширину, яка сягає до 100 км, а також мантійне походження (Чекунов, 1972; Соллогуб, Чекунов, 1975). К.Ф. Тяпкін (Тяпкін, 1965) першим в Україні, спираючись на роботу (Moody, Hill, 1956), звернув увагу на субгоризонтально зсувну тектоніку УЩ. На прикладі Криворіжжя він показав тісний зв'язок між розривними та складчастими структурами при провідній ролі перших. О.Б. Гінтов з колегами, досліджуючи тектонофізичними методами внутрішню структуру розломів УЩ, також встановив їх субгоризонтально зсувну природу, що знайшло відображення в роботі (Гінтов, Исая, 1988). Отже, першим внеском геофізиків у плитотектонічну парадигму стало надання пріоритету розломно-блоковій тектоніці та горизонтальним рухам земної кори. В.І. Старостенко з колегами узагальнив результати геолого-геофізичного вивчення геодинаміки Українських Карпат та Азово-Чорноморського регіону (Дослідження..., 2005; Старостенко и др., 2011), а сейсмотомографічні дослідження, розпочаті в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України в кінці ХХ ст. (Гейко и др., 1998), дозволили розглядати геодинамічні процеси на мантійному рівні. Це та значний обсяг виконаних в Україні за останні 25 років робіт ГСЗ у модифікації WARR (ширококутного відбиття/заломлення) (Старостенко та ін., 2024) наблизило українські дані з плейт-плюмтектоніки до рівня західних.

Таким чином, уже в першій чверті нашого століття було отримано велику кількість геофізичних даних, що вказують на необхідність перегляду моделей геологічного розвитку території України з геодинамічних позицій та, відповідно, вироблення нових поглядів на геолого-геофізичні критерії пошуків корисних копалин. **Метою** даного дослідження є викладення деяких принципових даних, котрі не залишають сумнівів у сказаному.

Узагальнення виконано за матеріалами, одержаними вченими Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Дослідження здійснені методами тектонофізики, ГСЗ (WARR), сейсмомографії, у проведенні яких та інтерпретації даних автори брали безпосередню участь. Також були залучені геологічні матеріали з вітчизняних і зарубіжних джерел, у яких геодинамічний характер процесів у корі та мантиї Землі підтримується і розвивається.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Відносно терміна «геодинаміка». В геологічних роботах цей термін нерідко трактується занадто розширено з включенням сюди практично всіх тектонічних рухів у земній корі, наприклад (Резвой, 1990; Кирилюк, 2012). Тому наведемо визначення цього терміна, надане В.Ю. Хаїним: «Геодинаміка як самостійна дисципліна в області наук про Землю оформилась у 70-і роки минулого століття. Її розвиткові сприяли прояви і швидке розповсюдження нової тектонічної концепції – теорії тектоніки літосферних плит, яка витіснила уявлення, що домінували в середині століття, про провідну роль у зміщеннях і деформаціях земної кори вертикальних рухів. Вона вивела на перше місце горизонтальні переміщення літосферних плит, котрі включали не тільки кору, але й верхи мантиї. Подальша розробка теорії тектоніки плит стала предметом нової синтетичної науки – геодинаміки, яка вивчає фізичні процеси, що зумовлюють розвиток твердої Землі в цілому, і сили, що їх викликають» (Хаин, 2000, с. 11) (тут і далі пер. цитат наш. – В.С., О.Г.). Тобто, коли ми говоримо про геодинаміку, то маємо на увазі саме плюм-плитову тектоніку.

Зараз у західній літературі не так вже й багато публікацій щодо тектоніки плит, тому що дослідники сприйняли її ще в минулому столітті. З розвитком сейсмічної томографії західні дослідники почали більше уваги приділяти плюмовій тектоніці, котра деякий час навіть «конкурувала» з плитовою (Dziewonski, 1984; Maruyama, 1994; Ritsema et al., 1999; Zhao, 2001; Romanowicz and Gung, 2002; Davies, 2005; Campbell, Kerr, 2007; Maruyama et al., 2007; Romanowicz, 2008 та ін.), але зараз вчені досягли консенсусу щодо взаємовпливу мантийних плюмів і літосферних плит, деякі з яких субдукують до межі «ядро-мантия» (Van der Hilst et al., 1997; Anderson, 2001; Fukao et al., 2001). Тобто і тектоніка плит, і тектоніка плюмів «...є складовими

частинами конвективних процесів у мантиї Землі» (Li, Zhong, 2009, p. 274). Це повністю підтверджує визначення, наведене В.Ю. Хаїним (Хаин, 2000).

2. Короткий огляд даних щодо України. Геодинамічне вивчення території України показало, що плито- та плюмтектонічні процеси супроводжують тектогенез практично з моменту утворення твердої оболонки Землі, а глибинні та суперглибинні потоки флюїдів продовжують формувати хіміко-мінеральний склад літосфери до теперішнього часу. Територія України з цього погляду є чудовим об'єктом дослідження, оскільки на її денну поверхню виходять гірські породи від еоархею до антропогену, а кора та мантия представлені як континентальним і субконтинентальним, так і океанічним (субокеанічним) типом. Глибинна будова кори та мантиї території України, без якої неможливе повноцінне судження про характер геодинамічних процесів, вивчена геофізичними методами на високому методичному рівні за участю багатьох міжнародних колективів (Старостенко та ін., 2024). У цілому, геологічний розвиток літосфери України на основі тектоніки плит можна вважати доведеним починаючи з рубежу близько 2 млрд років тому. Для того, щоб спростувати це (а тих, хто сумнівається, серед українських геологів чимало), потрібно віднести палеомагнетизм, палеокліматологію, польову тектонофізику, сейсморозвідку та сейсмотомографію до «лженаук». Сюди можна виокремити і деякі технології, наприклад, GPS-технологію, технологію розрахунку механізмів вогнищ землетрусів, технологію палеореконструкцій та побудови збалансованих геологічних розрізів та ін. (Очерки..., 2018).

Після рубежу 1,8–1,75 млрд років тому палеомагнітними та тектонофізичними дослідженнями в платформній Україні рух та обертання літосферних плит доведено для едіакарію (венду) та палеозою (Гинтов, 2001; Бахмутов и др., 2015), а для мезозою–кайнозою відкинуто всякі сумніви у провідній ролі плейт- і плюм-тектоніки у формуванні українських альпід (Дослідження..., 2005; Starostenko et al., 2024).

Більш складне питання з геодинамічним розвитком літосфери в неоархеї та ранньому протерозої, хоча, як на диво, ідеї плитової тектоніки, як вже зазначалося, почали розвиватись в Україні завдяки дослідженням Г.І. Каляєва саме з вивчення раннього докембрію. Палеомагнітно-інформативних порід віком старше 2 млрд років на УЩ поки не виявлено. Неоархейський вік деяких зон

розломів, що постулює тектонофізика, також потребує додаткових доказів. Те ж саме стосується інтерпретації петрології та структури архейських і ранньопротерозойських комплексів при віднесенні їх до розряду островодужних, сутурних і т. д. Хоча багато даних говорять про те, що східна та центральна частини УЩ у неоархеї та ранньому протерозої розвивалися в плитотектонічному режимі, все ж таки поки що можна говорити тільки про гіпотези. Єдиним чітко встановленим фактом є зсувна природа більшості зон розломів УЩ і провідна роль горизонтальних рухів при докембрійському структуроутворенні (Очерки..., 2018).

Однак і цього вже немало. Субгоризонтальні переміщення блоків літосфери у ранньому докембрії можуть бути поки що пояснені тільки з позиції конвективних рухів мантіїної речовини або розтікання плумів, оскільки гіпотези контракції та пульсації вже давно відкинуті. Тобто ми все ж таки

приходимо до необхідності розгляду тектонічних процесів у неоархеї та ранньому протерозої з позицій сучасної геодинаміки. Про це свідчать субдукційні следи, встановлені сейсмотомографією (Старостенко та ін., 2024) в зоні підсуву Фенноскандії під Сарматію, який відбувся у ранньому протерозої (Thybo et al., 2003; Bogdanova et al., 2006, 2008a, b). Важливим є встановлення тектонофізиками Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (Гінтов, 2005; Муровська, 2019; Мичак, 2019) полів субгоризонтальних напруг, що превалюють у земній корі на території всієї України, у тому числі в межах УЩ. Звісно, поля горизонтальних напруг у земній корі можна було б пояснювати й іншими причинами, але тектонофізики встановлюють їх по зсувах уздовж розломів, а зсуви у більшості випадків є також субгоризонтальними.

Все це узгоджується з сучасними сейсмотомографічними даними, зокрема й сейсмотомо-

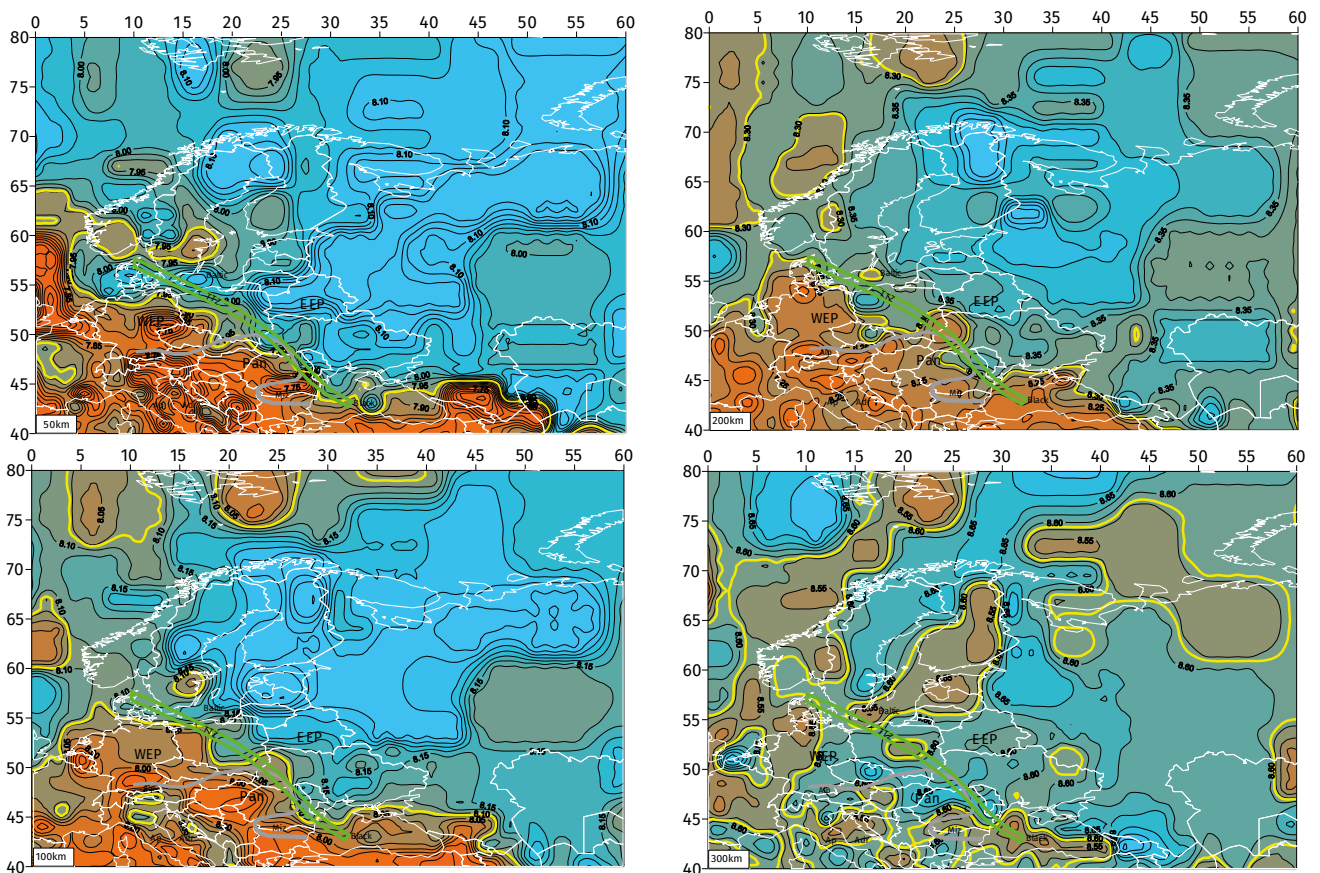


Рис. 1. Горизонтальні перетини тривимірної Р-швидкісної моделі мантії на рівнях 50, 100, 200 і 300 км у межах області переходу від ЄП до АГП, за роботою (Цветкова, Бугаєнко, 2012). Зелена подвійна лінія – ТТЗ, зелена тонка – швидкісна границя між підвищеними (відтінки блакитного) і зниженими (відтінки червоного) швидкостями (середня ізолінія для даної глибини). Білим позначено контури держав. Умовні позначення: Adr – Адріатичне море, Ap – Апенніни, Baltic – Балтійське море, Black – Чорне море, C – Карпати, WEP – Західноєвропейська платформа, Miz – Мізієвська плита, Pan – Паннонія, ТТЗ – зона Тейсейре-Торнквіста, ЕЕП – Східноєвропейська платформа

Fig. 1. Horizontal sections of the three-dimensional P-velocity model of the mantle 50, 100, 200, and 300 km within the transition zone between the Eurasian Plate and the Alpine-Himalayan belt after (Tsvetkova, Bugaenko, 2012). Double green line – TTZ, narrow green – velocity border between higher (shades of blue) and lower (shades of red) velocities (the middle isoline for a given depth). State borders are in white. Adr – the Adriatic Sea, Ap – the Apennines, Baltic – the Baltic Sea, Black – the Black Sea, C – the Carpathians, WEP – West European Platform, Miz – the Mizian Plate, Pan – Pannonia, TTZ – Teisseyre-Tornquist Zone, EEP – East European Platform

графічними дослідженнями вчених Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (Гейко и др., 1998, 2007; Геуко, 2004; Бугаенко и др., 2008; Цветкова, Бугаенко, 2012; Цветкова и др., 2016), які дозволили виявити швидкісні (V_p), а отже, й речовинні неоднорідності в мантії України до глибини 850 і навіть 2500 км.

Можна, наприклад, відзначити (рис. 1, 2), що швидкісна будова мантії в області переходу від Євразійської плити (ЄП) до Альпійсько-Гімалайського поясу (АГП), яка збігається з Транс'європейською шовною зоною (ТТЗ), на глибинах 50–700 км характеризується структурами північно-західного простягання, а глибше (750–800 км) простягання швидкісних неоднорідностей мантії стає північно-східним, і вони перетинають як ЄП, так і АГП. Тобто до глибини приблизно 700 км тектоносфера України та суміжних територій розвивалася за одними геодинамічними законами, а починаючи з глибини 750 км – за іншими. Крім того, мантіїні процеси виявилися інвертними: швидкісна структура мантії, яку ми спостерігаємо на рис. 1 (глибини 50–200 км), відображає область АГП

відносно низькошвидкісною, а ЄП – відносно високошвидкісною. А на глибинах 500–800 км (див. рис. 2) швидкісна структура мантії чітко обернена: область АГП відносно високошвидкісна, а область ЄП відносно низькошвидкісна. Між цими областями (250–400 км) – поступовий перехід.

Можна також навести приклад вертикальних сейсмотомографічних перетинів через ЄП, АГП та Африканську плиту, які доводять існування субдукційних слів, що занурюються у перехідну зону верхньої мантії та навіть у нижню мантію (рис. 3). Якщо горизонтальні мантіїні перетини (див. рис. 1, 2) побудовані в абсолютних значеннях V_p , то вертикальні (для більш чіткого відображення неоднорідностей мантії) – в аномаліях $\Delta V_p = V_p - V_{p_{\text{aver}}}$, де $V_{p_{\text{aver}}}$ або $V_{p_{\text{сеп}}}$ – середнє значення швидкості поздовжніх хвиль для даної глибини (Геуко, 2004).

На меридіональному перетині ΔV_p 28° сх. д. (див. рис. 3, а) на глибинах від 50–100 до 350–400 км чітко виділяються поринаючі один одному назустріч відносно високошвидкісні ($\Delta V_p = 0,10\text{--}0,15$ км/с) неоднорідності верхньої

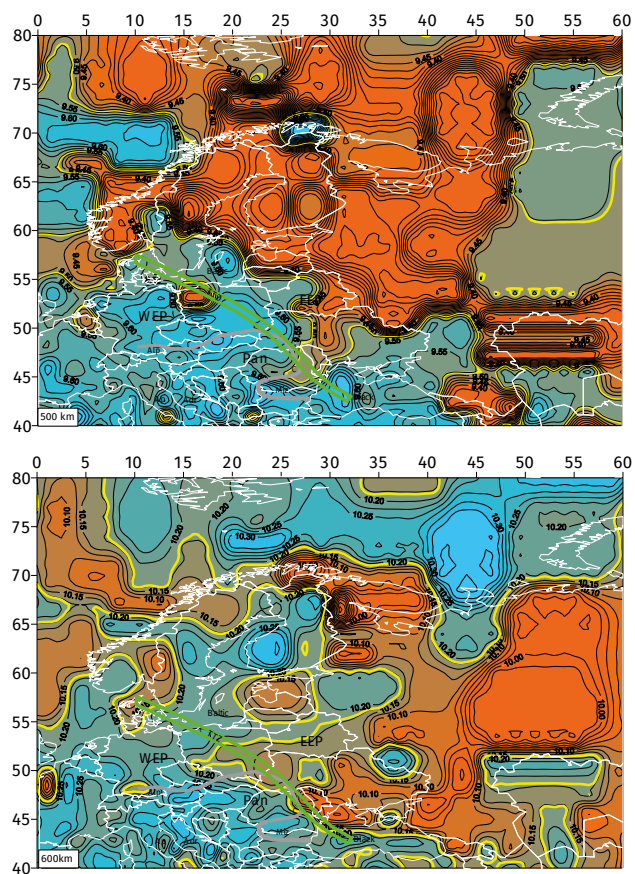


Рис. 2. Горизонтальні перетини тривимірної Р-швидкісної моделі мантії на рівнях 500, 600, 700 і 800 км, за роботою (Цветкова, Бугаенко, 2012). Умовні позначення див. на рис. 1

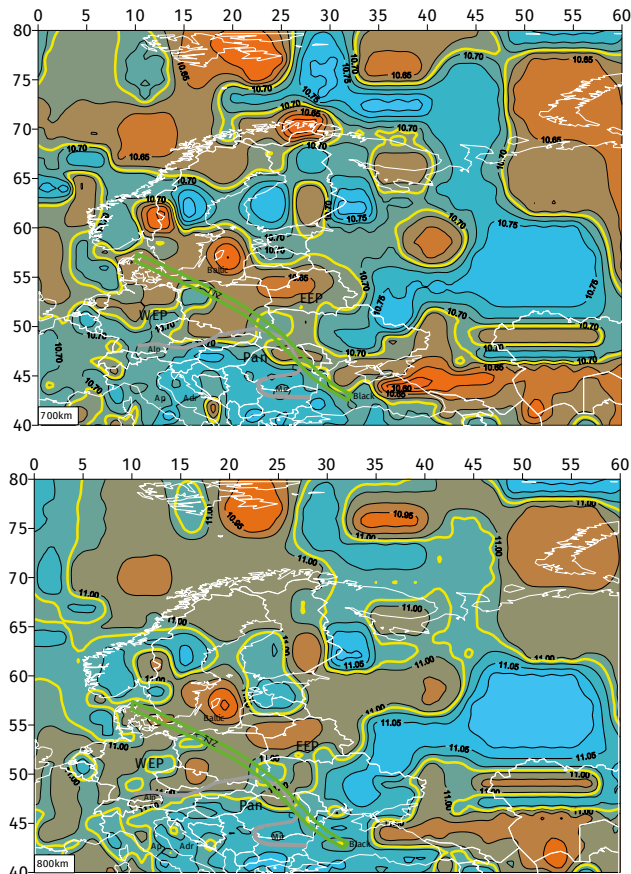


Fig. 2. Horizontal sections of the three-dimensional P-velocity model of the mantle at 500, 600, 700, and 800 km after (Tsvetkova, Bugaenko, 2012). Symbols as in Fig. 1

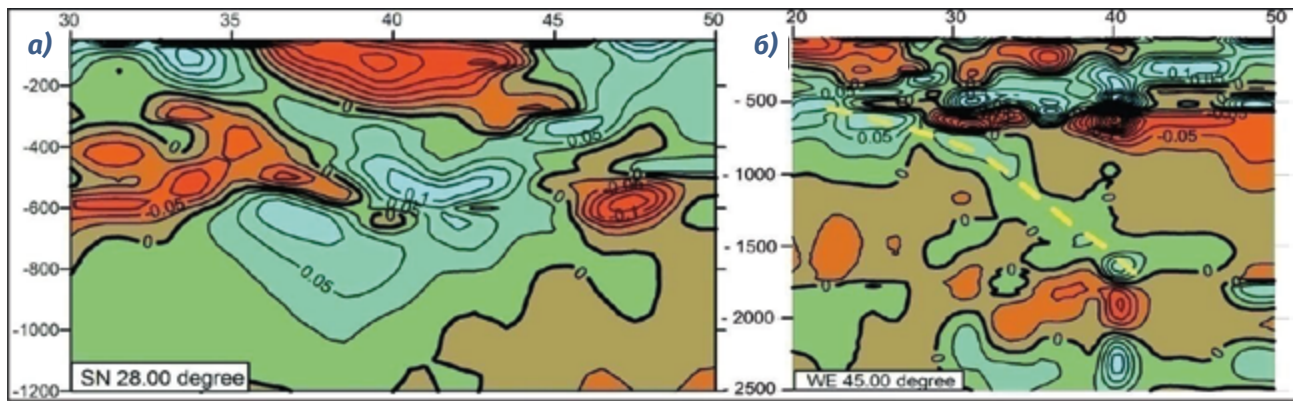


Рис. 3. Вертикальні перетини 3D Р-швидкісної моделі: а) вздовж меридіана 28° сх. д. між широтами 30° (Африканська плита) та 50° (ЄП) до глибини 1200 км; б) уздовж паралелі 45° пн. ш. між довготами 20° (ЄП) та 50° (Туранська плита) до глибини 2500 км (Гейко и др., 2007; Бугаенко и др., 2008). Ізолінії ΔV_p проведено через 0,025 км/с. Аномалії ΔV_p : блакитні та зелені – позитивні, червоні – негативні

Fig. 3. Vertical sections of the 3D P-velocity model: a – along the 28°E meridian between 30°S (African Plate) and 50°N (EP) down to a depth of 1200 km; b – along the 45°N parallel between 20°E (EP) and 50°E (Turanian Plate) down to a depth of 2500 km (Geyko et al., 2007; Bugaenko et al., 2008). ΔV_p isolines are spaced 0.025 km/s. ΔV_p anomalies: blue and green – positive, red – negative

мантії, максимальна товщина яких 150–170 км. На півдні (30–33° пн. ш.) занурення починається від північного краю Африканської плити з нижньою точкою занурення на глибині близько 350–400 км під північним краєм Егейської мікроплити. На півночі (48° пн. ш.) початок занурення спостерігається від південних районів ЄП до Балканід також до глибини 350–400 км. Відстань між точками початку занурення зустрічних неоднорідностей становить майже 1600 км, а між їх кінцями на глибині – близько 250 км.

Відображена на перетині 28° сх. д. високошвидкісна неоднорідність, що занурюється з півночі на південь, є слемом (або його слідом). Останній утворився під час субдукції Східноєвропейської платформи (СЄП) під Скіфську епіорогенну зону (Скіфську плиту) та Мізійський террейн у палеозой–ранньому мезозой при закритті Палеотетису (Юдин, 2007) або в юрі, за даними (Csontos, Vörös, 2004), у зв'язку зі скороченням Вардарського басейну та формуванням Добрудзького орогену. Він занурюється на глибину 350–400 км. Так само слемом є високошвидкісна неоднорідність, що занурюється на північ від Африканської плити на таку ж саму глибину. Він міг утворитися в кінці крейди або в еоцені, коли Африканська плита почала прискорено переміщатися у північному напрямку, максимально наближаючись до ЄП.

Звернімося тепер до широтного сейсмотомографічного перетину 45° пн. ш. (див. рис. 3, б). На рисунку видно, що вся мантія до глибини принаймні 2500 км неоднорідна і, головне, в ній, особливо в середній мантії, зонах розділу I та II,

спостерігається швидкісний елемент, який виявляється не так яскраво, як попередні, але все ж таки його не можна не помітити. Йдеться про відносно високошвидкісний ($\Delta V_p \geq 0,00$ км/с) похилий шар, який занурюється від перехідної зони верхньої мантії, тобто з глибини 700–750 до глибини 1700 км на схід між меридіанами 28–48° сх. д., тобто його протяжність сягає близько 2000 км, товщина – майже 300 км. Західна тектонічна межа початку його занурення проходить за довготою 28° сх. д. під Добруджею. Східний рубіж розташований під Каспієм.

Можливий механізм утворення похилого шару впливає з його просторового співвідношення з субмеридіональною зоною зустрічних поринаючих відносно високошвидкісних слемів, описаних вище (див. рис. 3, а). Проміжок шириною 250 км між слемами утворився через відрив та опущення на глибину 500 км і більше їх передових частин, які за рахунок еклогітизації корової речовини утворюють особливо високошвидкісну неоднорідність – лінзу. Ця неоднорідність, прориваючи перехідну зону верхньої мантії, занурюється перпендикулярно до слемів у середню мантію у вигляді похилого шару – даунвелінга. Таку картину на глобальному рівні вперше на основі даних сейсмотомографії описали японські дослідники (Maruyama, 1994; Fukao et al., 1994).

Дослідження геодинамічного напрямку, що ґрунтуються на сучасних геофізичних даних і пов'язані з територією України в цілому, висвітлені в нечисленних роботах, наприклад (Bogdanova et al., 2006, 2008a, b; Старостенко

и др., 2011, 2024; Гинтов, 2005, 2019). І хоча ці публікації важливі для дослідження геодинаміки України, залишається не вирішеним питання загальної геоісторичної послідовності геодинамічних процесів у ході формування земної кори досліджуваної території, що у геологічній науці є першочерговим. Нижче це питання розглядається щодо раннього докембрію УЩ на основі Міжнародної шкали геологічного часу (Стратиграфічний..., 2012).

3. Вікова послідовність геодинамічних процесів у ранньому докембрії УЩ.

Еоархей (4.0–3.6 Ga). У межах УЩ еоархейський комплекс ендербіто-гнейсів і тоналітів розвинений у Побужжі (максимальні цифри віку за окремими визначеннями становлять 3.65–3.78 Ga) та Приазов'ї (ендербіти, піроксеніти новопавлівського комплексу віком до 3.6–3.7 Ga) (Геохронологія..., 2005; Лобач-Жученко, 2014). Цей грануліто-гнейсовий комплекс, близький до метаморфізованих у гранулітовій фації порід тоналіт-тронд'єміт-гранодіоритової (ТТГ) асоціації, відомих на більшості щитів світу, зазнав багаторазового накладання процесів термальної переробки та стрес-метаморфізму між 3.4–1.9 Ga (Побужжя) та 3.4–2.0 Ga (Приазов'я). Більшість дослідників відносять його до первинної континентальної кори, виплавленої з базальтоїдів первинної океанічної кори (доповненої сіалічним матеріалом) під впливом плюмів.

Виходи еоархейських порід УЩ розділені в даний час мегаблоками палео-, мезо-, неоархейських та палеопротерозойських комплексів, тому більш детальний геодинамічний аналіз для еоархею практично неможливий. Судячи з тектонофізичних даних і палеорекострукцій для пізніших періодів, побужжкі та приазовські еоархейські комплекси під час свого формування належали до різних континентів або мікроконтинентів і ніколи не були єдиним цілим (Гинтов, 2019). Для більш детально вивчених еоархейських комплексів південно-західної Гренландії існують субдукційні, обдукційні, колізійні та плюмові моделі (Лобковський и др., 2004), хоча їх кількість свідчить про невирішення цього питання для еоархею в цілому.

Палеоархей (3.6–3.2 Ga). Палеоархейський комплекс ендербітів, ендербіто-гнейсів і тоналітів віком 3.3–3.4 Ga (Геохронологія..., 2005) і навіть 3.5–3.6 Ga (Лобач-Жученко, 2014) поки що трапляється тільки в Західному Приазов'ї та Оріхово-Павлоградській шовній зоні (ОПШЗ).

В Одеському кар'єрі Середнього Побужжя цифри віком 3.4 Ga отримані в еоархейських ендербіто-гнейсах на тлі реперних 3.65 Ga (Геохронологія..., 2005). Цей комплекс ТТГ слугує фундаментом для зеленокам'яних структур Приазов'я – Сорокинської, Косівцівської та ін. З геодинамічних позицій до з'ясування походження порід палеоархею УЩ можуть бути застосовані такі ж самі критерії, як і до еоархею.

Мезоархей (3.2–2.8 Ga). У межах УЩ розвинений один із найдавніших (3.2–3.0 Ga) зеленокам'яних комплексів Землі (Середньопридніпровський та частково Приазовський мегаблоки). Зеленокам'яні пояси (ЗКП) такого або навіть трохи давнішого віку відомі тільки в Південній Африці (провінція Каапваль) та Австралії (провінція Пілбара). Низи ЗКП УЩ представлені метаморфізованими толеїтовими базальтами, коматїїтами та породами кременисто-залізистої формації (Геохронологія..., 2005) – утвореннями, характерними і для інших ЗКП, та є, найвірогідніше, метаморфізованою океанічною корою. Однак ЗКП УЩ залягає на породах протоконтинентальної кори, складених біотитовими та біотит-амфіболовими гнейсами аульської та базавлуцької товщ, розповсюджених у вигляді останців серед широко розвинених тут плагіогранітоїдів ТТГ формації, одновікових із ЗКП. Крім того, в межах ОПШЗ вивчені породи ультрабазит-базит-тоналітової асоціації (новопавлівський комплекс) віком до 3.68 Ga, що є фрагментами протоокеанічної кори. Все це дало підстави Г.І. Каляєву та Є.Б. Глеваському зробити висновок (Глевасский, Каляев, 1998), що ЗКП УЩ належать до давніх примітивних острівних дуг, які були розділені океанічною літосферою. Остання вже в ранньому протерозої (за нашими даними, близько 2.45 Ga тому) субдукувала під Приазовський мегаблок з утворенням Оріхово-Павлоградської сутури. Однак, якщо відносити ЗКП навіть до примітивних острівних дуг, необхідно припускати, що в мезоархеї вже мала відбуватися нехай «примітивна», але субдукція. У нас поки що таких доказів для УЩ немає, оскільки геофізичні дані свідчать про деформації гірських порід у зонах розломів тільки починаючи з неоархею. Тому і початок плитотектонічних процесів ми розглядаємо лише з неоархею.

Неоархей (2.8–2.5 Ga). Найважливішим у неоархейську епоху слід вважати рубіж 2.8 ± 0.1 Ga. У цей час з'явилися перші зсувні зони розломів (у Східній мікроплиті, можливо, 3.0 Ga тому), перші потужні товщі кварцитів (найбільше їх

у Голованівській, Інгулецько-Криворізькій шовних зонах та ОПШЗ), у Західній мікроплиті відбувся новий «спалах» ендербітового магматизму (Літинський, Луполовський кристалічні масиви, омоложення ендербіто-гнейсів гайворонського комплексу), у Східній мікроплиті з'явилися перші масиви плагіомікроклінових гранітів (мокрomosковський, токівський комплекси) та новий «спалах» інтрузій плагіогранітів ТТГ формації (обіточенський, шевченківський та інші комплекси) (Геохронологія..., 2005). У неогархеї почалося зближення Західної та Східної мікроплит, що встановлюється за зсувними переміщеннями вздовж зон розломів, і скорочення океанічних басейнів, які розділяли ці мікроплити, а також Середньопридніпровський та Приазовський мегаблоки (мікроплити). Важливо відзначити, що процес початку закриття океанів, зближення мікроплит та їх подальшого розсування збігається в часі з передбачуваним об'єднанням архейських мегаблоків Землі в Пангею-0 (Хаин, Божко, 1988), що закінчилося до межі 2.5 Ga та її розпадом близько 2.0 Ga.

Палеопротерозой-I (2.5–2.0 Ga). Рубіж 2.5 Ga (МШГВ) або 2.6 Ga (Загальна стратиграфічна шкала докембрію України), який прийнятий як границя між археєм і протерозоем, щодо українського докембрію є певною мірою штучним, принаймні для західної та приазовської частин УЩ (Пономаренко и др., 2014), оскільки вікові межі багатьох серій та комплексів перекривають рубіж. Це ще раз доводить, що мегаблоки щита ще на початку протерозою були террейнами, розвивалися незалежно один від одного та їх глибинна будова загалом близька лише настільки, наскільки дозволяли загальні закони утворення зовнішніх оболонок Землі.

Геодинамічні процеси в палеопротерозой-I були найбільш активними, оскільки зближення мікроплит супроводжувалося в окремих місцях розсувами, що привело до формування Інгуло-Інгулецького осадового басейну та початку утворення Херсонсько-Смоленської шовної зони. У центральній частині УЩ утворилася густа мережа зон розломів, у тому числі Тальнівська та Криворізько-Кременчуцька, які відокремили східну частину Західної мікроплити та західну частину Східної, структурно оформивши Голованівську та Інгулецько-Криворізьку шовні зони. До кінця періоду практично завершилося формування криворізької та бузької серій, а також сформувалася росинсько-тікицька гнейсово-амфіболітова серія.

На півночі почалося зближення мікроконтинентів Фенноскандії та Сарматії, що завершилося у палеопротерозой-II субдукцією першої під другу та колізією. На заході та північному заході щита (Подільський та Волинський мегаблоки) утворилася значна частина порід дністровсько-бузької та породи тетерівської серій, бердичівський та житомирський комплекси гранітоїдів. Омоложення верхньої частини дністровсько-бузької серії до палеопротерозою-I (Геохронологія..., 2008) викликає питання, що ж є субстратом еогархейських ендербіто-гнейсів Побужжя. Нижня частина дністровсько-бузької серії, що відноситься до тиврівської товщі двопіроксенових кристалічних сланців і гнейсів, не давніша за палеогархею, тому не може бути таким субстратом. В еогархейських ендербіто-гнейсах є лінзи та ксеноліти ультраосновних порід – метаортопіроксенітів – з віком за цирконом $(3.67 \pm 0.004) - (3.485 \pm 0.033)$ Ga (метаморфічна подія) (Лобач-Жученко и др., 2013). Якщо це не будиновані дайки, то необхідно було б спеціально виділити нову, еогархейську товщу порід, які є продуктом древньої океанічної кори та протолітом ендербіто-гнейсів.

Палеопротерозой-II (2.0–1.6 Ga), особливо його перша половина є одним з найпотужніших «спалахів» гранітоїдного магматизму, в тому числі плутонізму, на всьому щиті. У цей період утворилися основні та кислі вулканіти клесівської серії та гранітоїди осницького комплексу, що сформували південно-західну частину протяжного Осницько-Мікашевичського магматичного поясу, сланці та метапісковики пугачівської та топільнянської серій, а також низку невеликих інтрузивних масивів основного та кислого складу Волинського мегаблоку. Під час або після субдукції Фенноскандії під активну північну та західну окраїни Сарматії сформувалися Коростенський і Корсунь-Новомиргородський плутони габро-анортозитів і рапаківі, були закладені Овруцька та Вільчанська западини. У Приазовському мегаблоці утворилися масиви сублужних і лужних гранітів. У зонах розломів Інгульського мегаблоку відбулися процеси активізації з формуванням натрових метасоматитів – альбітітів і сієнітів, родовищ урану та золота.

Всі ці процеси призвели до консолідації всіх шовних зон УЩ, «зпаюванню» мегаблоків і формуванню мікроконтиненту Сарматія, після чого утворився та простягся через весь щит паралельно його осі широкий пояс базитових дайок.

Кінець палеопротерозою відрізняється по-дібністю процесів консолідації сіалічної кори на більшості континентів світу. Це дозволило висловити ідею про утворення суперконтиненту Пангея-I близько 1.7 Ga тому (Хаин, Божко, 1988).

Для періоду, що розглядається, з'являються перші сейсмічні дані, що підтверджують плитотектонічний характер геодинамічних процесів. Матеріали ГСЗ у модифікації WARR вказують на існування зони субдукції Фенноскандії під Сарматію, а тектонофізичні та палеомагнітні дані – на поворот Сарматії проти годинникової стрілки на 54° за її колізії з Фенноскандією 1.83–1.75 Ga тому та утворення ними разом із мікроконтинентом Волго-Уралією континенту Балтика (Bogdanova et al., 2008a).

Висновки

Таким чином, геофізичні дані доводять, що починаючи з середини раннього протерозою тектонічні процеси на території України відбувалися за типовими механізмами плейт-плюм-тектоніки. Обґрунтовано існування субдукційних слейбів, які занурюються до низів верхньої мантії та у нижню мантію. Показано, що мегаблоки УЩ ще на початку протерозою були террейнами, розвивалися незалежно один від одного. Консолідація щита та формування мікроконтиненту Сарматія відбулися між 2.5 та 2.0 Ga.

Стосовно більш ранніх періодів є впевненість, що в неоархеї та першій половині раннього протерозою ці механізми також діяли, хоча, можливо, плюмові процеси переважали над плитними. Головне, що довели геофізичні дослідження, – це домінування в даний період горизонтальних рухів літосфери над вертикальними та визначну роль зсувних процесів у структуроутворенні.

Деякі дослідники раннього докембрію Гренландії застосовують плитотектонічні моделі навіть до еоархейських комплексів (напр., Лобковский і др., 2004), проте геофізичні дані цього не підтверджують (Гинтов, 2019). Термальна переробка ранньодокембрійських порід УЩ відбувалася вже в палеоархеї, але під впливом плюмових процесів.

Аналізуючи результати геофізичного вивчення геодинамічних процесів, варто звернути увагу на те, що геологи нерідко надто спрощено сприймають результати геологічної інтерпретації геофізичних матеріалів, особливо таких, як ГСЗ або гравітаційне моделювання. Через це «фіксистський» підхід іноді здається кращим

«мобілістського», оскільки шари земної кори та літосферної мантії, що характеризуються певними швидкісними та густинними параметрами, простежуються по латералі практично безперервно і на глибинах одного порядку. Але варто враховувати, що фізико-геологічний розріз літосфери не залишається постійним у часі, а пристосовується до перебігу ендо- та екзогенних процесів, які змінюють РТ-умови в літосфері. Тому швидкісні та густинні моделі відображають структуру та речовинний склад кори та мантії, що сформувалися як до, так і після консолідації УЩ. Крім того, поняття «гранітний», «діоритовий», «базальтовий» шари, «коромантійна суміш» мають умовний характер, відповідно до усереднених швидкісних і густинних параметрів. Петрологічно ж у різних мегаблоках вони можуть мати різний склад, враховуючи сумарний, іноді протилежний вплив на склад корових шарів процесів регіонального метаморфізму, флюїдних потоків, диференціації глибинних розплавів та ін.

Насамкінець відзначимо, що в минулі геологічні епохи геодинамічні процеси були більш активними, ніж геодинамічна картина сучасних процесів у Землі. Сучасні процеси та рухи мантійної речовини «стирають» геофізичні ознаки більш древніх процесів у постійно змінюваній середній та нижній мантії, що омолоджується. Але в твердій літосфері та ділянках мезосфери, що примикають до неї, окремі елементи зон субдукції та плюмів того часу можуть зберігатися. Звичайно, їх було б важко розпізнавати, не маючи геологічних і геофізичних даних, отриманих про ранньодокембрійську земну кору. Приклад Канадського та Українського щитів показує (Гинтов, 2019), що це в принципі можливо. Земна кора докембрійських щитів також інтенсивно термодинамічно перероблялася процесами гранітизації та базифікації, які можна порівняти з дією гарячих точок, тоді розвинених ширше, ніж зараз. На террейнах УЩ ці процеси були найактивнішими в інтервалі $2,0 \pm 0,2$ Ga. Тому геодинамічні процеси цього та пізніших періодів фіксуються геофізичними та геологічними даними.

Розглянуті вище етапи геодинамічної еволюції УЩ, що перекриваються в часі, не вичерпують всіх можливих епізодів його неоархейсько-протерозойського геодинамічного розвитку. Їхнє вивчення необхідно продовжувати. Але для цього потрібно зацікавити європейські геологічні та геофізичні організації у прокладенні

суперсучасного геотраверсу ГСЗ уздовж осової частини УЩ на місці геотраверсу IV, який уже застарів. Нові методики польових досліджень, обробки та інтерпретації матеріалів ГСЗ дозволять детальніше вивчити швидкісний розріз кори, проникнути глибше розділу Мохо та виявити

нові структурні елементи для пізнання докембрійських геодинамічних процесів. Вважаємо, що отримані при цьому результати становили б інтерес не лише для української, а й світової геологічної спільноти.

Розглянуто результати геологічних і геофізичних досліджень, які зробили суттєвий внесок у перегляд деяких питань щодо геодинамічних процесів у земній корі та мантиї України. Геологічними і тектонофізичними дослідженнями встановлено субгоризонтальні рухи вздовж розломів і поля горизонтальних напруг, що охоплюють земну кору всіх регіонів України. Разом з палеомагнітними даними показано, що мікроконтинент Сарматія був повернутий проти годинникової стрілки під час колізії з Фенноскандією. Сейсмотомографічними роботами доведено існування субдукційних слейбів, які занурюються до низів верхньої мантиї та у нижню мантию. Ці дані вказують на те, що починаючи з неогархею Український щит розвивався за механізмами плитово-плюмової тектоніки. Стосовно більш ранніх періодів показано, що термальна переробка ранньодокембрійських порід Українського щита відбувалася вже в палеогархеї, але під впливом плюмових процесів. Конкретизовано вікову послідовність геодинамічних процесів у ранньому докембрії щита. Зокрема, встановлено, що **еогархейські** комплекси Українського щита під час свого формування належали до різних континентів або мікроконтинентів та ніколи не були єдиним цілим. **Палеогархейський** тоналіт-тронд'єміт-гранодіоритовий комплекс слугує фундаментом для зеленокам'яних структур Приазов'я – Сорокинської, Косівцівської та ін. З геодинамічних позицій до з'ясування походження порід палеогархею щита можуть бути застосовані такі ж самі критерії, як і до еогархею. **Мезогархейський** зеленокам'яний комплекс Українського щита є одним з найдревніших зеленокам'яних поясів Землі. Низи зеленокам'яних поясів щита є, найвірогідніше, метаморфізованою океанічною корою, яка лежить на гнейсах континентальної кори, що говорить про можливість субдукційних процесів вже у мезогархеї, хоча геофізичні дані цього не підтверджують. У **неогархеї** почалося зближення Західної та Східної мікроплит щита та скорочення океанічних басейнів, які розділяли ці мікроплити. На початку **протерозою** мегаблоки Українського щита були ще террейнами, розвивалися незалежно один від одного. Консолідація щита та формування мікроконтиненту Сарматія почалися між 2.5 та 2.0 Ga. Кінець **палеопротерозою** відзначився одним з найпотужніших «спалахів» гранітоїдного магматизму на всьому щиті, відбулася субдукція Фенноскандії під Сарматію і кінцева консолидація Українського щита. Цей процес збігається з процесами консолидації сіалічної кори на більшості континентів світу.

Список літератури

- Бахмутов В., Еленська М., Кадзялко-Хофмоль М., Поляченко Е., Константинович Л., Жулковський П. Палеомагнітні та петромагнітні дослідження нижнедевонських красноцветов Подолі: проблеми перемагнічування. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37, № 1. С. 62–82.
- Бондарчук В.Г. Геологічна структура УРСР. Київ: Вид-во АН УРСР і Київ. держ. ун-ту, 1946. 122 с.
- Бугаенко И.В., Шумлянская Л.А., Заец Л.Н., Цветкова Т.А. Трехмерная Р-скоростная модель мантии Черного моря и прилегающей территории. *Геофиз. журн.* 2008. Т. 30, № 5. С. 145–160.
- Гейко В.С., Бугаенко И.В., Шумлянская Л.А., Заец Л.Н., Цветкова Т.А. 3-D Р-скоростное строение верхней мантии Восточно-Средиземноморья. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29, № 4. С. 13–30.
- Гейко В.С., Цветкова Т.А., Санникова Н.П., Ливанова Л.П., Гейко К.В. Региональная 3-D Р-скоростная структура мантии северо-западной Евразии – I. Европа. *Геофиз. журн.* 1998. Т. 20, № 3. С. 67–91.
- Геодинамическая карта Украины. Масштаб 1:1 000 000. Объяснительная записка. Сост. В.Г. Пастухов, К.П. Астахов, М.К. Багинян. Галецкий Л.С. (отв. ред.). Киев, 1993. 213 с.
- Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей: Щербак Н.П. (отв. ред.). Киев: Наукова думка, 2005. 244 с.
- Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Щербак Н.П. (отв. ред.). Киев: Наукова думка, 2008. 240 с.
- Гинтов О.Б. Планетарные деформации земной коры, ротация Земли и движение литосферных плит. *Геофиз. журн.* 2001. Т. 23, № 4. С. 69–82.
- Гинтов О.Б. Плитово-плюмовая тектоника как единый механизм геодинамического развития тектоносферы Украины и смежных регионов. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41, № 6. С. 3–4. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190064>
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применения при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б., Исая В.М. Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. Киев: Наукова думка, 1988. 229 с.
- Глевасский Е.Б., Каляев Г.И. Докембрий и тектоника плит (проблема плитотектонических реконструкций юго-западного сегмента Восточно-Европейской платформы). *Геология и стратиграфия докембрия Украинского щита*: Тез. доп. Всеукр. міжвідом. наради (Київ, квітень 1998 р.). Київ, 1998. С. 38–40.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат: Старостенко В.І. (ред.). Київ: Наукова думка, 2005. 256 с.
- Каляев Г.И. Земная кора Украинского щита и тектоника плит. *Геол. журн.* 1976. Т. 36, вып. 1 (166). С. 29–41.
- Кирилук В.П. «Геодинамика» и раннедокембрийская геология щитов древних платформ. *Геодинаміка*. 2012. № 2 (13). С. 43–54.
- Личков Б.Л. Движение материков и климаты прошлого Земли. Ленинград: Изд-во АН СССР, 1935. 127 с.
- Личков Б.Л. Про тектонічні рухи Української кристалічної кори та етапи розвитку Північноукраїнської мульди. *Вісн. Укр. геол. кому.* 1925. Вип. 6.
- Лобач-Жученко С.Б. Древние кратоны – возраст, строение, состав, геодинамика. *Минерал. журн.* 2014. Т. 35, № 4. С. 61–70.
- Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Балтыбаев Ш.К., Степанюк Л.М., Пономаренко А.Н., Лохов К.И., Корешкова М.Ю., Юрченко А.В., Егорова Ю.С., Сукач В.В., Бережная Н.Г., Богомоллов Е.С. Этапы формирования побужского гранулитового комплекса по данным изотопно-геохронологических исследований (Среднее Побужье, Украинский щит). *Минерал. журн.* 2013. Т. 36, № 2. С. 86–98.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. Москва: Научный мир, 2004. 612 с.
- Мичак С.В. Структурні особливості і кінематичний розвиток земної кори західної частини Українського щита: автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 2019. 40 с.
- Муровська А.В. Глибинна будова та альпійська геодинаміка Карпатського та Кримсько-Чорноморського регіонів України: автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 2019. 39 с.

- Очерки геодинамики Украины: Старостенко В.И., Гинтов О.Б. (ред.). Киев: ВІ ЕН ЕЙ, 2018. 465 с.
- Паталаха Є.І., Гончар В.В. Инденторний механізм в геодинаміці Кримсько-Чорноморського регіону. *Геологія і геохімія горючих копалин*. 2003. № 3–4. С. 90–95.
- Паталаха Е.И., Сенченков И.К., Трофименко Г.Л. Проблемы тектоно-геодинамической эволюции юго-западного фор-ланда Восточно-Европейского кратона и его орогеничес-кого обрамления. Киев: ЭКМО, 2004. 233 с.
- Пономаренко А.Н., Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В. Геохро-нология и геодинамика палеопротерозоя Украинского щита. *Минерал. журн.* 2014. Т. 36, № 2. С. 48–60.
- Резвой Д.П. Геодинамика или «геодинамика»? *Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол.* 1990. Т. 65, вып. 3. С. 116–124.
- Слензак О.І. Про структуру Українського докембрію (на при-кладі південно-західної частини Українського кристаліч-ного щита). Київ: Наукова думка, 1965. 139 с.
- Соллогуб В.Б., Чекунов А.В. Глубинное строение и структура земной коры. *Проблемы физики Земли на Украине*. Киев: Наукова думка, 1975. С. 113–142.
- Старостенко В.И., Гинтов О.Б., Кутас Р.И. Геодинамическое развитие литосферы Украины и его роль в формирова-нии и размещении месторождений полезных ископае-мых. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33, № 3. С. 3–22.
- Старостенко В.І., Гінтов О.Б., Муровська Г.В., Мичак С.В., Ли-синчук Д.В. Тектоніка і глибинна будова південно-захід-ної частини Східноєвропейського кратону в межах Укра-їни. Ч. II. *Геофіз. журн.* 2024. Т. 46, № 5. С. 3–31. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287>
- Стратиграфічний кодекс України. 2-е вид. Київ: Логос, 2012. 64 с.
- Субботин С.И. Вопросы теории тектогенеза. *Проблемы физики Земли на Украине*. Киев: Наукова думка, 1975. С. 144–154.
- Тяпкін К.Ф. Про здвигову тектоніку в межах Криворіжжя. *Доп. АН УРСР. Сер. Б.* 1965. № 4. С. 96–99.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Науч-ный мир, 2000. 606 с.
- Хаин В.Е., Божко Н.А. Историческая геотектоника. Докембрий. Москва: Недра, 1988. 384 с.
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В. Сейсмотомография мантии под Восточно-Европейской платформой: мантийные скоро-стные границы. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34, № 5. С. 161–172. <https://doi.org/10.24028/gzh.02033100.v34i5.2012.116672>
- Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Заец Л.Н. Скоростная дели-мость мантии под Украинским щитом. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38, № 4. С. 75–87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802>
- Чекунов А.В. Структура земной коры и тектоника юга евро-пейской части СССР. Киев: Наукова думка, 1972. 176 с.
- Юдин В.В. Геодинамика Черноморско-Каспийского региона. Киев: Изд. УкрГГРИ, 2007. 143 с.
- Anderson D.L. Top-down tectonics? *Science*. 2001. Vol. 293. P. 2016–2018. <https://doi.org/10.1126/science.1065448>
- Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Ko- zlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu.A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. *Precam- brian Research*. 2008a. Vol. 160 (1–2). P. 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.024>
- Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Guterch A., Janik T., Ko- zlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L. EUROBRIDGE: New insight into the geodynamic evolution of the East European Craton. In: Gee D.G., Stephenson R.A. (Eds.), *European Lithosphere Dynamics*. Geological Society, London, 2006. No. 32. P. 599–628. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.0136>
- Bogdanova S.V., Starostenko V.I., Gintov O.B., Pashkevich I.K., Ku- prienko P.Ya., Kutas R.I., Makarenko I.B., Tsvetkova T.A. Long- lived E-W fault zones in the lithosphere of Western Sarmatia. *Geophysical Research. Abstr.*, 1–18 Apr., 2008. Vienna, Austria, 2008b. CD-ROM.
- Campbell I.H., Kerr A.C. The great plume debate: testing the plume theory. *Chemical Geology*. 2007. Vol. 241 (3–4). P. 149–152. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.013>
- Csontos L., Vörös A. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatol- ogy, Palaeoecology*. 2004. Vol. 210 (1). P. 1–56. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.033>
- Davies G.F. A case for mantle plumes. *Chinese Science Bulletin*. 2005. Vol. 50 (15). P. 1541–1554. <https://doi.org/10.1360/982005-918>
- Dziewonski A.M. Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1984. Vol. 89 (B7). P. 5929–5952. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05929>
- Fukao Y., Maruyama S., Obayashi M., Inoue H. Geologic implica- tion of the whole mantle P-wave tomography. *The Journal of the Geological Society of Japan*. 1994. Vol. 100 (1). P. 4–23. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.4>
- Fukao Y., Widiyantoro S., Obayashi M. Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region. *Review of Geophysics*. 2001. Vol. 39 (3). P. 291–323. <https://doi.org/10.1029/1999RG000068>
- Geyko V.S. A general theory of the seismic travel-time tomogra- phy. *Geophysical Journal*. 2004. Vol. 26 (2). P. 3–32.
- Li Z.-X., Zhong S. Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: Plate dominance in whole-mantle tectonics. *Physics of the Earth and Plane- tary Interiors*. 2009. Vol. 176 (3–4). P. 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.05.004>
- Maruyama S. Plume tectonics. *The Journal of the Geologi- cal Society of Japan*. 1994. Vol. 100 (1). P. 24–49. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.24>
- Maruyama S., Santosh M., Zhao D. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: mantle dynamics and anti-plate tecton- ics on the core-mantle boundary. *Gondwana Research*. 2007. Vol. 11 (1–2). P. 7–37. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.06.003>
- Moody J., Hill M. Wrench-fault tectonics. *Geological Society of America Bulletin*. 1956. Vol. 67 (9). P. 1207–1246. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[1207:WT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[1207:WT]2.0.CO;2)
- Ritsema H.J., van Heijst J.H., Woodhouse J.H. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*. 1999. Vol. 286. P. 1925–1928. <https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1925>
- Romanowicz B. Using seismic waves to image Earth's internal structure. *Nature*. 2008. Vol. 451. P. 266–268. <https://doi.org/10.1038/nature.06583>
- Romanowicz B., Gung Y.C. Super-plumes from the core-mantle boundary to the lithosphere: Implications for heat flux. *Sci- ence*. 2002. Vol. 296. P. 513–516. <https://doi.org/10.1126/sci- ence.1069404>
- Starostenko V., Janik T., Murovskaya A., Czuba W., Środa P., Yegorova T. Seismic lithospheric model across Ukrainian Shield from the Carpathians to the Dnieper-Donets Ba- sin and its tectonic interpretation. *Tectonophysics*. 2024. Vol. 892. 230540. <https://doi.org/10.1016/j.tec- to.2024.230540>
- Thybo H., Janik T., Omelchenko V.D., Grad M., Garetsky R.G., Be- linsky A.A., Karatayev G.I., Zlotski G., Knudsen M.E., Sand R., Yliniemi J., Tiira T., Luosto U., Komminaho K., Giese R., Gu- terch A., Lund C.-E., Kharitonov O.M., Ilchenko T., Lysin- chuk D.V., Skobelev V.M., Doody J.J. Upper lithospheric seis- mic velocity structure across the Ukrainian Trough and the Ukrainian Shield along the EUROBRIDGE'97 profile. *Tectono- physic*. 2003. Vol. 371. P. 41–79. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00200-2)
- Vander Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*. 1997. Vol. 386. P. 578–584. <https://doi.org/10.1038/386578a0>
- Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 192, No. 3. P. 251–265. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00465-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00465-4).

References

- Anderson D.L. 2001. Top-down tectonics? *Science*, 293, 2016–2018. <https://doi.org/10.1126/science.1065448>
- Bakhmutov V., Yelenska M., Kadzyalko-Hofmokl M., Polyachenko E., Konstantinenko L., Zhulkovsky P. 2015. Paleomagnetic and petromagnetic studies of Lower Devonian red beds of Podolia: problems of magnetization reversal. *Geophysical Journal*, 37 (1), 62–82 (in Russian).
- Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Guterch A., Janik T., Kozlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L. 2006. EUROBRIDGE: New insight into the geodynamic evolution of the East European Craton. In: Gee D.G., Stephenson R.A. (Eds.), *European Lithosphere Dynamics. Geological Society, London, Memoirs*, 32, 599–628. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.36>
- Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu.A. 2008a. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 160 (1–2), 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.024>
- Bogdanova S.V., Starostenko V.I., Gintov O.B., Pashkevich I.K., Kuprienko P.Ya., Kutas R.I., Makarenko I.B., Tsvetkova T.A. 2008b. Long-lived E-W fault zones in the lithosphere of Western Sarmatia. *Geophysical Research. Abstr.*, 13–18 Apr., 2008. Vienna, Austria. CD-ROM.
- Bondarchuk V.G. 1946. Geological structure of the Ukrainian SSR. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR and Kyiv State University. 122 p. (in Ukrainian).
- Bugayenko I.V., Shumlyanskaya L.A., Zayets L.N., Tsvetkova T.A. 2008. Three-dimensional P-velocity model of the Black Sea mantle and adjacent territory. *Geophysical Journal*, 30 (5), 145–160 (in Russian).
- Bakhmutov V., Yelenska M., Kadzyalko-Hofmokl M., Polyachenko E., Konstantinenko L., Zhulkovsky P. 2015. Paleomagnetic and petromagnetic studies of Lower Devonian red beds of Podolia: problems of magnetization reversal. *Geophysical Journal*, 37 (1), 62–82 (in Russian).
- Campbell I.H., Kerr A.C. 2007. The great plume debate: testing the plume theory. *Chemical Geology*, 241 (3–4), 149–152. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.01.013>
- Chekunov A.V. 1972. Structure of the earth's crust and tectonics of the south of the European part of the USSR. Kyiv: Naukova Dumka. 176 p. (in Russian).
- Csontos L., Vörös A. 2004. Mesozoic plate tectonic reconstruction of the Carpathian region. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 210 (1), 1–56. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.02.033>
- Davies G.F. 2005. A case for mantle plumes. *Chinese Science Bulletin*, 50 (15), 1541–1554. <https://doi.org/10.1360/982005-918>
- Dziewonski A.M. 1984. Mapping the lower mantle: Determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89 (B7), 5929–5952. <https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05929>
- Fukao Y., Maruyama S., Obayashi M., Inoue H. 1994. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 100 (1), 4–23. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.4>
- Fukao Y., Widiyantoro S., Obayashi M. 2001. Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region. *Review of Geophysics*, 39 (3), 291–323. <https://doi.org/10.1029/1999RG000068>
- Geyko V.S. 2004. A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geophysical Journal*, 26 (2), 3–32.
- Geyko V.S., Bugayenko I.V., Shumlyanskaya L.A., Zayets L.N., Tsvetkova T.A. 2007. 3-D P-velocity structure of the upper mantle of the Eastern Mediterranean. *Geophysical Journal*, 29 (4), 13–30 (in Russian).
- Geyko V.S., Tsvetkova T.A., Sannikova N.P., Livanova L.P., Geyko K.V. 1998. Regional 3-D P-velocity structure of the mantle of northwestern Eurasia – I. Europe. *Geophysical Journal*, 20 (3), 67–91 (in Russian).
- Geodynamic map of Ukraine. Scale 1:1,000,000. Explanatory note. 1993. Compiled by V.G. Pastukhov, K.P. Astakhov, M.K. Baginyan. (Ed. L.S. Galetsky). Kyiv. 213 p. (in Russian).
- Gintov O.B. 2005. Field tectonophysics and its applications in studying deformations of the earth's crust of Ukraine. Kyiv: Phoenix. 572 p. (in Russian).
- Gintov O.B. 2001. Planetary deformations of the earth's crust, rotation of the Earth and movement of lithospheric plates. *Geophysical Journal*, 23 (4), 69–82 (in Russian).
- Gintov O.B. 2019. Plate-plume tectonics as a single mechanism of geodynamic development of the tectonosphere of Ukraine and adjacent regions. *Geophysical Journal*, 41 (6), 3–4. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190064> (in Russian).
- Gintov O.B., Isay V.M. 1988. Tectonophysical studies of consolidated crust faults. Kyiv: Naukova Dumka. 229 p. (in Russian).
- Glevassky E.B., Kalyaev G.I. 1998. Precambrian and plate tectonics (the problem of plate tectonic reconstructions of the southwestern segment of the East European Platform). *Geology and stratigraphy of the Precambrian of the Ukrainian Shield: Abstracts of the All-Ukrainian Interdepartmental Conference*, Kyiv, April 1998 (pp. 38–40) (in Ukrainian).
- Kalyaev G.I. 1976. Earth's crust of the Ukrainian Shield and plate tectonics. *Geologichnij zhurnal*, 36 (1), 29–41 (in Russian).
- Khain V.E. 2000. Tectonics of Continents and Oceans. Moscow: Nauchny Mir. 606 p. (in Russian).
- Khain V.E., Bozhko N.A. 1988. Historical geotectonics. Precambrian. Moscow: Nedra. 384 p. (in Russian).
- Kirilyuk V.P. 2012. “Geodynamics” and Early Precambrian Geology of Ancient Platform Shields. *Geodynamics*, 2 (13), 43–54 (in Russian).
- Li Z.-X., Zhong S. 2009. Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: Plate dominance in whole-mantle tectonics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 176 (3–4), 143–156. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.05.004>
- Lichkov B.L. 1935. Movement of Continents and Climates of the Earth's Past. Leningrad: Publ. House of the USSR Academy of Sciences. 127 p. (in Russian).
- Lichkov B.L. 1925. On the tectonic movements of the Ukrainian crystalline belt and the stages of development of the North Ukrainian trough. *Bulletin of the Ukrainian Geological Committee*, 6 (in Ukrainian).
- Lobach-Zhuchenko S.B. 2014. Ancient cratons: age, structure, composition, geodynamics. *Mineralogical Journal*, 35 (4), 61–70 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko S.B., Balagansky V.V., Baltybaev Sh.K., Stepanyuk L.M., Ponomarenko A.N., Lokhov K.I., Koreshkova M.Yu., Yurchenko A.V., Egorova Yu.S., Sukach V.V., Berezhnaya N.G., Bogomolov E.S. 2013. Formation stages of the Pobuzhsky granulite complex according to isotope-geochronological studies (Middle Pobuzhye, Ukrainian Shield). *Mineralogical Journal*, 36 (2), 86–98 (in Russian).
- Lobkovsky L.I., Nikishin A.M., Khain V.E. 2004. Modern problems of geotectonics and geodynamics. Moscow: Nauchny Mir. 612 p. (in Russian).
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics. *The Journal of the Geological Society of Japan*, 100 (1), 24–49. <https://doi.org/10.5575/geosoc.100.24>
- Maruyama S., Santosh M., Zhao D. 2007. Superplume, supercontinent, and post-perovskite: mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary. *Gondwana Research*, 11 (1–2), 7–37. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.06.003>
- Moody J., Hill M. 1956. Wrench-fault tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 67 (9), 1207–1246. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[1207:WTJ2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[1207:WTJ2.0.CO;2)
- Murovska A.V. 2019. Deep structure and alpine geodynamics of the Carpathian and Crimean-Black Sea regions of Ukraine. Doctor's thesis. Kyiv. 39 p. (in Ukrainian).

- Mychak S.V. 2019. Structural features and kinematic development of the earth's crust of the western part of the Ukrainian Shield. Doctor's thesis. Kyiv. 40 p. (in Ukrainian).
- Patalakha Ye.I., Gonchar V.V. 2003. Indentation mechanism in geodynamics of the Crimean-Black Sea region. *Geology and Geochemistry of Fossil Fuels*, 3–4, 90–95 (in Ukrainian).
- Patalakha E.I., Senchenkov I.K., Trofimenko G.L. 2004. Problems of tectono-geodynamic evolution of the southwestern foreland of the East European Craton and its orogenic framework. Kyiv: EKMО. 233 p. (in Russian).
- Ponomarenko A.N., Stepanyuk L.M., Shumlyansky L.V. 2014. Geochronology and geodynamics of the Paleoproterozoic of the Ukrainian Shield. *Mineralogical Journal*, 36 (2), 48–60 (in Russian).
- Rezvoy D.P. 1990. Geodynamics or “geodynamics”? *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Department of Geology*, 65 (3), 116–124 (in Russian).
- Ritsema H.J., van Heijst J.H., Woodhouse J.H. 1999. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*, 286, 1925–1928. <https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1925>
- Romanowicz B. 2008. Using seismic waves to image Earth's internal structure. *Nature*, 451, 266–268. <https://doi.org/10.1038/nature.06583>
- Romanowicz B., Gung Y.C. 2002. Super-plumes from the core-mantle boundary to the lithosphere: Implications for heat flux. *Science*, 296, 513–516. <https://doi.org/10.1126/science.1069404>
- Shcherbak N.P. (Ed.). 2005. Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Archean. Kyiv: Naukova Dumka. 244 p. (in Russian).
- Shcherbak N.P. (Ed.). 2008. Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Proterozoic. Kyiv: Naukova Dumka. 240 p. (in Russian).
- Slenzak O.I. 1965. On the structure of the Ukrainian pre-Cambrian (on the example of the southwestern part of the Ukrainian crystalline shield). Kyiv: Naukova Dumka. 139 p. (in Ukrainian).
- Sollogub V.B., Chekunov A.V. 1975. Deep structure and structure of the earth's crust. In: *Problems of Earth Physics in Ukraine* (pp. 113–142). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Starostenko V.I. (Ed.). 2005. Research on the modern geodynamics of the Ukrainian Carpathians. Kyiv: Naukova Dumka. 256 p. (in Ukrainian).
- Starostenko V.I., Gintov O.B. (Eds.). 2018. Essays on Geodynamics of Ukraine. Kyiv: VI EN EY. 465 p. (in Russian).
- Starostenko V.I., Gintov O.B., Kutas R.I. 2011. Geodynamic development of the lithosphere of Ukraine and its role in the formation and location of mineral deposits. *Geophysical Journal*, 33 (3), 3–22 (in Russian).
- Starostenko V.I., Gintov O.B., Murovska G.V., Mychak S.V., Lysynchuk D.V. 2024. Tectonics and deep structure of the southwestern part of the East European Craton within Ukraine. Part II. *Geophysical Journal*, 46 (5), 3–31. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i5.310287> (in Ukrainian).
- Starostenko V., Janik T., Murovska A., Czuba W., Środa P., Yegorova T. 2024. Seismic lithospheric model across Ukrainian Shield from the Carpathians to the Dnieper-Donets Basin and its tectonic interpretation. *Tectonophysics*, 892, 230–540. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2024.230540>
- Stratigraphic Code of Ukraine. 2nd ed. 2012. Kyiv: Logos. 64 p. (in Ukrainian).
- Subbotin S.I. 1975. Questions of the theory of tectogenesis. *Problems of Earth Physics in Ukraine* (pp. 144–154). Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Thybo H., Janik T., Omelchenko V.D., Grad M., Garesky R.G., Belinsky A.A., Karatayev G.I., Zlotski G., Knudsen M.E., Sand R., Yliniemi J., Tiira T., Luosto U., Komminaho K., Giese R., Guterch A., Lund C.-E., Kharitonov O.M., Ilchenko T., Lysynchuk D.V., Skobelev V.M., Doody J.J. 2003. Upper lithospheric seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian Shield along the EUROBRIDGE'97 profile. *Tectonophysics*, 371, 41–79. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00200-2)
- Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V. 2012. Seismic tomography of the mantle beneath the East European platform: mantle velocity boundaries. *Geophysical Journal*, 34 (5), 161–172. <https://doi.org/10.24028/gzh.02033100.v34i5.2012.116672> (in Russian).
- Tsvetkova T.A., Bugaenko I.V., Zayets L.N. 2016. Velocity divisibility of the mantle beneath the Ukrainian Shield. *Geophysical Journal*, 38 (4), 75–87. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i4.2016.107802> (in Russian).
- Tyapkin K.F. 1965. On shear tectonics within the boundaries of Kryvyi Rih. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Ser. B*, 4, 96–99 (in Ukrainian).
- Vander Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R. 1997. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, 386, 578–584. <https://doi.org/10.1038/386578a0>
- Yudin V.V. 2007. Geodynamics of the Black Sea-Caspian region. Kyiv: Publ. UkrGGRI. 143 p. (in Russian).
- Zhao D. 2001. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3), 251–265. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00465-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00465-4).