

УДК550.372/373+551.24.055

DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322502>

Астеносфера України за даними геоелектричних досліджень

***Т.К. Бурахович, В.А. Ільєнко, А.М. Кушнір, А.Ю. Столпаков,
Є.М. Тонковид, А.М. Бондар, 2025***

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

Вперше створено модель-схему геоелектричної астеносфери, параметри якої отримано за узагальненням моделей, побудованих на основі експериментальних електромагнітних даних. Підтверджено параметри трьох «нормальних» розрізів ρ_n для різних за віком геологічних регіонів України. Аномалії високої електропровідності у верхній мантії мають складну конфігурацію, різну інтенсивність і глибину і не завжди відповідають геології. Астеносферу в південно-західних мегаблоках локальних ділянках Інгільського мегаблока Українського щита, а також в південній частині Волино-Подільської плити виділено фрагментарно на глибинах від 50—70 до 120—160 км з питомим опором 20—50 Ом·м. Локальні об'єкти в Прип'ятсько-Дніпровсько-Донецькій западині мають схожі параметри. У Скіфській плиті визна-

Citation: Burakhovych, T.K., Iliencko, V.A., Kushnir A.M., Stolpakov A.Y., Tonkovyd, E.M., & Bondar, A.M. (2025). The asthenosphere of Ukraine according to geoelectric studies. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 181—187. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322502>.

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/>).

ISSN 0203-3100. *Geophysical Journal*. 2025. Vol. 47. № 2

181

чено аномальні області: кора—мантія (глибиною від 30—40 до 60 км з питомим опором 10 Ом·м) і верхня мантія (глибиною 60—90 км з питомим опором 100 Ом·м). У Карпатському регіоні астеносфера неоднорідна, ймовірно, складається з областей, які відрізняються за питомим опором і можуть розгалужуватися з глибиною. Підтверджено загальне заглиблення її верхньої межі на північний схід від 40 до 90—100 км.

Ключові слова: електромагнітні дослідження, питомий електричний опір, астеносфера, моделі різних геолого-тектонічних регіонів України.

Вступ. Дані електромагнітних досліджень відображають питомий електричний опір (ρ) всього літосферного розрізу, а отже, можуть бути одним з найважливіших джерел інформації для розуміння структури, складу і еволюції літосфери. Астеносфера за геоелектричними даними — це проміжний електропровідний шар у верхній частині мантії, на глибині з верхнім краєм приблизно від 50 до 200 км з ρ не більше 100 Ом·м і сумарною позовжньою провідністю не менше 400 См, який, імовірно, визначається частковим або повним плавленням речовини.

Тісний зв'язок розподілу ρ у надрах верхньої мантії з термодинамічними умовами та фазовим станом порід потребує розглядати параметри астеносфери з урахуванням віку геологічних структур. Зараз прийнято використовувати три «нормальні» розрізи ρ_H з глибиною (рисунок) для різновікових геологічних регіонів України [Kushnir et al., 2021 та посилання в ній]. Так, докембрійські та герцинські характеризуються відсутністю астеносфери (в інтервалі глибин $H=0\div 160$ км, $\rho_H=1000\div 2000$ Ом·м), кіммерійські ($H=110\div 140$ км, $\rho_H=40$ Ом·м) та альпійські ($H=70\div 170$ км, $\rho_H=25$ Ом·м) відрізняються збільшеною електропровідністю (σ) на мантійних глибинах. Досвід надглибинного дослідження мантії за даними геомагнітних обсерваторій України показав, що верхня мантія під Передкарпатським прогином, Причорноморською западиною та Скіфською плитою більш електропровідна, ніж під Українським щитом (УЩ). Ці дані якісно узгоджуються з «нормальними» розрізами до глибини ≈ 700 км.

Метою даної статті є створення та аналіз параметрів моделі-схеми геоелектричної астеносфери різновікових геологіч-

них структур в Україні на підставі узагальнення результатів інтерпретації глибинних моделей розподілу ρ (різного ступеня від дво- до тривимірних), які отримано за експериментальними даними глибинного магнітотелуричного зондування і магнітоваріаційного профілювання.

Астеносфера тектонічних структур України. Сьогодні на території України завдяки багаторічним електромагнітним дослідженням Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України та роботам геофізичних організацій геологічної служби України накопичено величезний експериментальний матеріал. На його підставі побудовано та проінтерпретовано: 2D моделі Карпатської, Кіровоградської та інших аномалій електропровідності (АЕ), квазі3D плівкові моделі, які надали уявлення про просторове поширення АЕ у земній корі та верхній мантії, регіональні та локальні 3D моделі розподілу ρ у надрах різних геолого-тектонічних регіонів України [Бурахович, Кушнір, 2023 та посиланням в ній].

УЩ, Волино-Подільська плита. Розподіл ρ на мантійних глибинах від 50—70 до 120 км відповідає «нормальному» для УЩ (див. рисунок, ①), крім південно-західної частини, яку частково відокремлює на сході (майже субмеридіонально вздовж 30° сх.д.) тектонічна зона Одеса—Гомель, на півночі (майже субширотно вздовж 50° пн.ш.) Андрушівська зона розломів. Астеносферна область поширюється за межами УЩ на півдні Волино-Подільської плити (ВПП), де її північно-західна границя трасується між Суцано-Пержанською та Тетерівською зонами розломів. На півночі Молдавської плити можливо проходить її південна межа за Кишинівською зоною розломів. За параметрами астеносфера є неоднорідною та диференційованою за ρ та інтервалом

глибин: від 48° пн.ш. на північ (Подільський і південний захід Росинсько-Бузького мегаблоків УЩ та ВПП, див. рисунок, ① а) $\rho=50$ Ом·м, $H=70\div120$ км, на південь (схил УЩ та північ Молдавської плити, див. рисунок 1, ① б) $\rho=25$ Ом·м, $H=50\div120$ км. На південний захід спостерігається занурення верхньої кромки астеносфери до глибини 90—100 км (зона Тейссейре—Торнквіста) проте характер її з'єднання з астеносферою Карпатсько-Паннонського регіону залишається нез'ясованими (див. рисунок, ④ б).

Яворівська АЕ (див. рисунок, ① с) характеризуються астеносферою $H=50\div100$ км з $\rho=70$ Ом·м, яка пояснюється прогріванням надр та появою високомінералізованих флюїдів та/або можливим частковим плавленням порід, крім того, є прикладом прояву процесів новітньої активізації разом з Чернівецькою, Бельцькою, Тарханкутською та іншими АЕ, які вишиковуються вздовж західної та південно-західної межі Східноєвропейської платформи (СЄП).

Можна припустити існування кількох локальних осередків ($H=50\div120$ км, $\rho=50$ Ом·м) в Інгульському мегаблоці УЩ (див. рисунок, ① d) уздовж трансрегіонального шва Херсон—Смоленськ.

Більш впевнено можна уявити існування мантійного провідника в області півдня центральній частині УЩ та його схилу (див. рисунок, ① е). Його максимальне поширення на північ до $47^\circ40'$ пн.ш. спостерігається вздовж Кіровоградської АЕ, у зоні віялоподібного сходження глибинних розломів — Західноінгулецького, Криворізько-Кременчуцького та ін. На північний схід (до 48° пн.ш. і 34° сх.д.) можна припустити занурення астеносфери на глибину 125—160 км ($\rho=20$ Ом·м) під південним заходом Середньопридніпровського мегаблока УЩ та його схилу (див. рисунок, ① f). За геоелектричними параметрами та просторовим розподілом, ймовірно, що астеносферні області під західною та центральною частинами УЩ гальванічно пов'язані.

За результатами 1D інверсії експериментальних геоелектричних досліджень

Приазовського мегаблока можна припустити наявність глибинної коромантійної ($H=10\div50$ км) низькоомної ($\rho\approx100$ Ом·м) ділянки, що розташована біля межі Східного Приазов'я зі Скіфською плитою у районі Грузько-Єланчицької зони розломів (див. рисунок, ① g).

Прип'ятський прогин, Дніпровсько-Донецька западина та Донецька складчаста споруда. За сучасними геоелектричними дослідженнями Брагінсько-Львівського виступу і Чернігівського блока Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) виявлено східний край Прип'ятської АЕ, яка вирізняється глибиною астеносфери 50—100 км з $\rho=20$ Ом·м (див. рисунок, ② а).

Область Кіровоградської АЕ під ДДЗ (Лохвицький сегмент) характеризується ймовірно просторово ізолюваними неоднорідностями у верхах мантії, які мають різні параметри: $H=50\div160$ км, $\rho=20$ Ом·м для об'єкта ізометричної форми з центром 50° пн.ш. і 33° сх.д., щомістить північ центральної частини УЩ, південний борт та осьову частину ДДЗ (див. рисунок, ② б); $H=20\div70$ км, $\rho=50$ Ом·м та $H=90\div150$ км, $\rho=20$ Ом·м (за результатами 1D інверсії) для північного борту ДДЗ та півдня Воронежського кристалічного масиву (див. рисунок, ② с).

На жаль, ідентифікація параметрів астеносфери Донецької складчастої споруди на разі неможлива з огляду на недостатню щільність експериментальних електромагнітних спостережень у широкому діапазоні періодів і значні неоднорідності σ порід, що залягають вище по розрізу, як поблизу поверхні (тобто точки реєстрації), так і в земній корі (на глибинах від 2 до 30 км отримано АЕ із сумарною поздовжньою провідністю від 500 до 20000 См). Проте у ранніх роботах І.І. Рокитянського зі співавторами (1994) присутня інформація про наявність (за профілем Амвросіївка—Луганськ) електропровідного шару ($H=100\div120$ км, $\rho=40$ Ом·м) ймовірно обмеженого простягання. Також у роботі І.М. Логвінова та О.С. Лисенко (1995) у рамках еквівалентності моделей вздовж геотраверсу Приморськ—Свято-

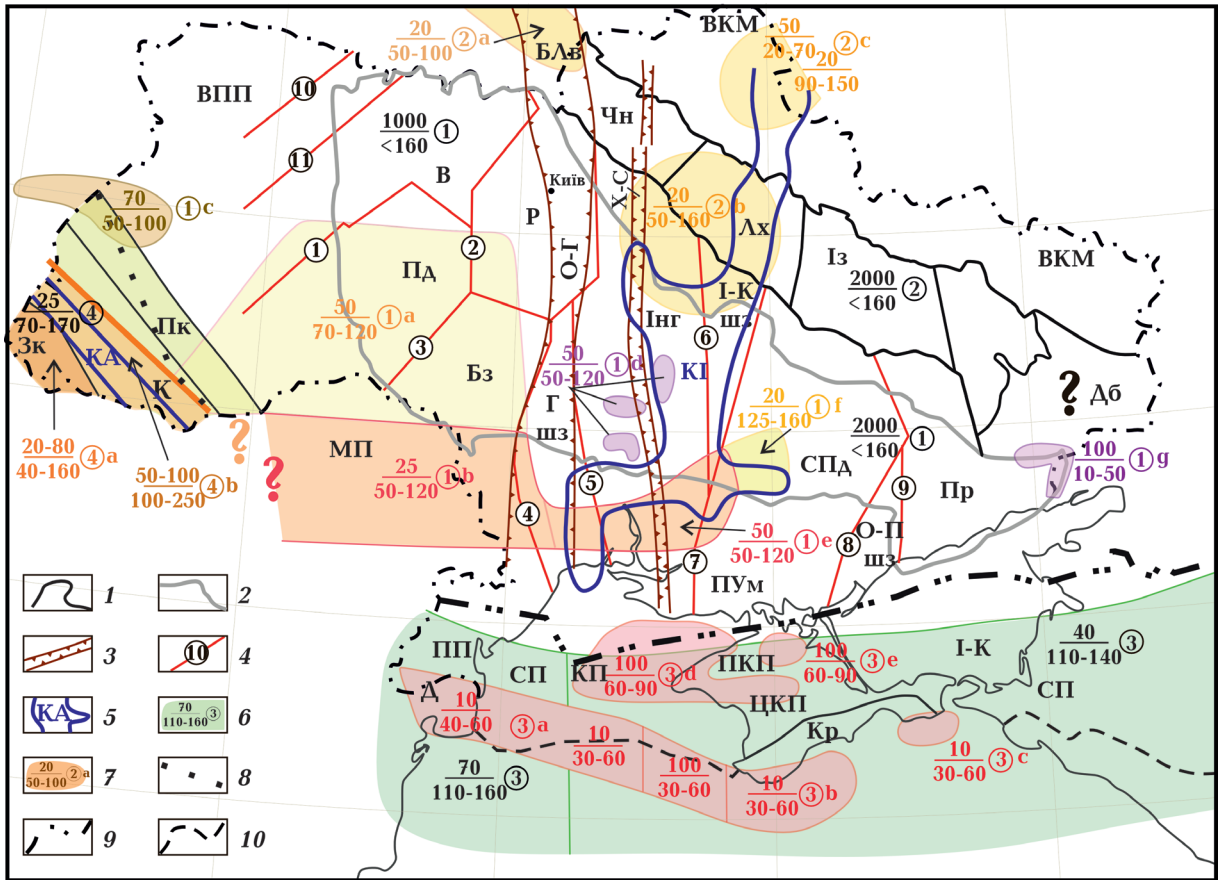


Рис. 1. Модель-схема геоелектричної астеносфери України: 1 — межа Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ); 2 — контур Українського щита (УЩ); 3 — тектонічна зона Одеса—Гомель (О-Г) і трансрегіональний шов Херсон—Смоленськ (Х-С); 4 — головні розломи (цифри в кружках) (1 — Тетерівський, 2 — Брусилівський, 3 — Немирівський, 4 — Тальнівський, 5 — Первомайський, 6 — Західноінгулецький, 7 — Криворізько-Кременчуцький, 8 — Оріхово-Павлоградський, 9 — Азово-Павлоградський, 10 — Луцький, 11 — Сущано-Пержанський); 5 — контури регіональних аномалій електропровідності в земній корі: Кіровоградської (КІ) і Карпатської (КА); 6 — області астеносфери та її параметри у «нормальних» розрізах ρ_n з глибиною для різновікових геологічних регіонів України (① — докембрійські, ② — герцинські, ③ — кіммерійські, ④ — альпійські); 7 — області астеносфери та її параметри (чисельник — значення питомого електричного опору, Ом·м, знаменник — інтервал глибин, км); 8 — зона Тейссейре—Торнквіста (ТТЗ); 9 — південна межа СЄП; 10 — межа Скіфської плити (СП). Мегаблоки УЩ: В — Волинський, Пд — Подільський, Р — Росинський, Бз — Бузький, Інґ — Інгулецький, СПд — Середньопридніпровський, Пр — Приазовський. Шовні зони: Гшз — Голованівська, І-Кшз — Інгулецько-Криворізька, О-Пшз — Оріхово-Павлоградська. Сегменти ДДЗ: БЛв — Брагінсько-Лоевський виступ, Чн — Чернігівський, Лх — Лохвицький, Із — Ізюмський, Дб — Донбаський. Складчасті системи: Добруджі (Д), Криму (Кр), Карпат (К). Прогини К: Пк — Передкарпатський, Зк — Закарпатський; прогини СП: ПП — Переддобруджинський, КП — Каркінітський, ПКП — Північнокримський, І-К — Індоло-Кубанський; підняття СП: ЦКП — Центрально-Кримське. ВКМ — схил Воронезького кристалічного масиву, ВПП — Волино-Подільська плита, ПУм — Південноукраїнська монокліналь, МП — Молдавська плита.

Fig. 1. Model-scheme of the geoelectric asthenosphere of Ukraine: 1 — border of the Dnipro-Donetsk Depression (ДДЗ); 2 — contour of the Ukrainian Shield (УЩ); 3 — Odesa-Gomel tectonic zone (О-Г) and Kherson-Smolensk transregional suture (Х-С); 4 — main faults (numbers in circles) (1 — Teterivskiy, 2 — Brusylivskiy, 3 — Nemyrovskiy, 4 — Talnivskiy, 5 — Pervomaiskiy, 6 — Zakhidnoinguletskiy, 7 — Kryvyi Rih-Kremenchukskiy, 8 — Orikhovo-Pavlohradskiy, 9 — Azov-Pavlohradskiy, 10 — Lutskiy, 11 — Sushchano-Perzhanskiy); 5 — contours of regional anomalies of electrical conductivity in the earth's crust: Kirovograd (КІ) and Carpathian (КА); 6 — asthenosphere regions and its parameters in «normal» sections ρ_n with depth for geological regions of Ukraine of different ages (① — Precambrian, ② — Hercynian, ③ — Cimmerian, ④ — Alpine); 7 — asthenosphere regions and its parameters (numerator — resistivity value, Ohm·m, denominator — depth interval, km); 8 — Teisseyre-Tornquist zone (ТТЗ); 9 — southern boundary of the SEP; 10 — boundary of the Scythian Plate (СП). Mega-blocks of the U.S.: V — Volynskiy, Pd — Podilskiy, R — Rosinskyy, Bz — Buzkiy, Ing — Inguletskiy, SPd — Srednyopridnipskiy, Pr — Priazovskiy. Suture zones: Gshz — Holovanivskaya, I-Kshz — Inguletsko-Krivoriyskaya, O-Pshz — Orikhovo-Pavlogradskaya. Segments of the DDZ: BLv — Braginskoye-Loevskiy outcrop, Chn — Chernigivskiy, Lkh — Lohvitskiy, Iz — Iziumskiy, Db — Donbasskiy. Folded systems: Dobruzh (D), Crimea (Kr), Carpath (K). Synclines K: Pk — Predcarpathian, Zk — Zakarpatskiy; synclines SP: PP — Preddobrudzhinskiy, KP — Karakinitskiy, PKP — Pivnichnokrimskiy, I-K — Indolo-Kubanskiy; uplifts of the SP: TSKP — Central-Crimean. VKM — slope of the Voronezh crystalline mass, VPP — Volyno-Podilskaya plate, PUm — South Ukrainian monocline, MP — Moldavian plate.

— southern boundary of the EEP; 10 — boundaries of the Scythian plate (СП). *Megablocks of the Ukrainian Shield*: В — Volynian, П — Podolian, Р — Rosynian, Бз — Buzkyi, Інг — Ingulian, СПД — Sredneprydnirovskiy, Пр — Priazovskiy. *Suture zones*: Гшз — Golovanivska, І-Кшз — Ingulets-Kryvorizka, О-Пшз — Orikhivo-Pavlohradska. *Segments of the Dnieper-Donets Basin*: БЛв — Braginsko-Loyevskiy uplift, Чн — Chernihivskiy, Лх — Lohvytsia, Із — Izyumskiy, Дб — Donbas. *Fold systems*: Dobrudja (Д), Crimea (Кр), Carpathians (К); *K troughs*: Пк — Pre-Carpathian trough, Зк — Transcarpathian trough; *СП troughs*: ПП — Predobrogea, КП — Karkinitzky, ПКП — North Crimean, І-К — Indolo-Kuban; *uplift СП*: ЦКП — Central Crimean. ВКМ — Voronezh crystalline massif slope, ВПП — Volyno-Podolsk plate, ПУм — South Ukrainian monocline, МП — Moldavian plate.

ве міститься об'єкт на глибині 50—100 км з $\rho=70$ Ом·м у північній частині профілю.

Добрудзьсько-Чорноморсько-Кримський регіон. Нагадаємо, що «нормальний» неактивізований розподіл вирізняється повсюдною астеносферою $H=110\div140$ км, $\rho_H=40$ Ом·м (див. рисунок, ③). Проте у 3D моделі в надрах південного борту Переддобрудзьського прогину і Північної Добруджі та Одеського шельфу він (за розрахунками) прийнятий з $H=110\div160$ км, $\rho_H=70$ Ом·м. Вище шару «нормальної» астеносфери виявлено значну кількість локальних аномалій різної конфігурації та ρ . Найдовша простягається з північного заходу (від Добрудзьського регіону, між двома глибинними розломами: Кілійським і Печенег-Камена, осьова частина аномалії відповідає Сулинській зоні розломів), перетинаючи північно-західний шельф Чорного моря (див. рисунок, ③ а), на південний схід (майже оминаючи Кримський регіон (див. рисунок, ③ б)) на коромантійних глибинах від 30—40 до 60 км з $\rho=10\div100$ Ом·м. Східніше в акваторії Чорного моря та південніше Керченського півострова (між Південно-керченським і Правдінським розломами) виявлено локальний ізометричної форми астеносферний об'єкт зі схожими параметрами (див. рисунок, ③ с). Складною конфігурацією практично ізометричної форми характеризується астеносфера шельфу Чорного моря та заходу Кримського регіону (на Скіфській плиті: Каркінітський та Північнокримський прогини та Центральнo-Кримське підняття) з $H=60\div90$ км, $\rho=100$ Ом·м (див. рисунок, ③ d). Локальну астеносферу з подібними параметрами виявлено у Сиваському грабені західніше Чонгарського розлому (див. рисунок, ③ е).

Карпатський регіон. Астеносферний

шар є характерною рисою «нормально-го» неактивізованого розподілу питомого опору в Карпатсько-Паннонському регіоні (див. рисунок, ④). Загалом, вважається, що астеносфера поглиблюється (H від 50—70 до 170 км, $\rho=25$ Ом·м) у напрямку від неогенового Паннонського басейну до СЄП, тобто повністю виклинюється під Передкарпатським прогином і відсутня в надрах на півночі Волино-Подільської монокліналі. За результатами 1D інверсії сучасних експериментальних електромагнітних досліджень астеносферу зафіксовано в Українських Карпатах в області від Закарпатського прогину до Скибових покривів. Вона не є однорідним шаром, ймовірно складається з ділянок, які диференційовані за опором і можуть розгалужуватися за глибиною. Підтверджено загальне поглиблення верхньої кромки астеносфери на північний схід від 40 до 90—100 км. Так, у Закарпатському прогині її параметри $H=40\div160$ км, $\rho=20\div80$ Ом·м (див. рисунок, ④ а), проте під Кросненським, Поркулецьким і Дуклянським покривами H від 90—100 до 180—250 км, $\rho=50\div100$ Ом·м (див. рисунок, ④ б).

Висновки та обговорення. Основний результат електромагнітних досліджень території України полягає в тому, що геоелектричну астеносферу зафіксовано повсюдно в кіммерійських та альпійських утвореннях і лише фрагментарно під докембрійським УЩ. Відомо, що в нижній корі і мантії питомий електричний опір контролюється переважно кількістю та складом флюїду, пористістю та температурою, вмістом водню в номінально безводних мінералах, а також графітом [Unsworth, Rondenay, 2013; Selway, 2014; Lin et al., 2023]. Графітові півки на границях мінеральних зерен також підвищують

електропровідність, але тільки до верхів верхньої мантії, тому що стійкі до температур 900 °С. Флюїди, які надходять із субдукуючої плити або з плюму, можуть збагачувати літосферу воднем (насамперед, як незв'язаний елемент, він виділяється в процесі плавлення або високотемпературних тектонічних явищ) і вуглецем, що сприяє збільшенню її електропровідності.

Тобто, згідно з [Selway, 2014], літосфера може виступати як непряме відображення рівня її збагачення привнесеними елементами. Тому у статті [Lin et al., 2023] закликають при геолого-геофізичній інтерпретації спостережених високопровідних структур повністю враховувати геологічну обстановку та історію розвитку досліджуваної території.

Список літератур

- Бурахович Т., Кушнір А. Історія, сучасний стан та перспективи геоелектромагнітних досліджень в Україні. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2023. Т. 1. № 100. 58—66. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.07>.
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilienکو, V., & Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *European Association of Geoscientists & Engineers. Geoinformatics* (Vol. 2021, pp. 1—6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116>.
- Lin, W., Yang, B., Han, B., & Hu, X. (2023). A Review of Subsurface Electrical Conductivity Anomalies in Magnetotelluric Imaging. *Sensors*, 23(4), 1803. <https://doi.org/10.3390/s23041803>.
- Selway, K. (2014). On the Causes of Electrical Conductivity Anomalies in Tectonically Stable Lithosphere. *Surveys in Geophysics*, 35, 219—257. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9235-1>.
- Unsworth, M., & Rondenay, S. (2013). Mapping the distribution of fluids in the crust and lithospheric mantle utilizing geophysical methods. In *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock* (pp. 535—598). Berlin-Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_13.

The asthenosphere of Ukraine according to geoelectric studies

**T.K. Burakhovych, V.A. Ilienکو, A.M. Kushnir, A.Y. Stolpakov,
E.M. Tonkovyd, A.M. Bondar, 2025**

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

For the first time, a model-scheme of the geoelectric asthenosphere was created, the parameters of which were obtained by generalizing the models built based on experimental electromagnetic data. The parameters of three «normal» sections of ρ_n for geological regions of Ukraine of different ages are confirmed. High electrical conductivity anomalies in the upper mantle have a complex configuration, different intensity and depth, and do not always correspond to the geology. The asthenosphere in the southwestern megablocks, local areas of the Ingul Megablock of the Ukrainian Shield, as well as the southern part of the Volyn-Podilsky Plate is picked fragmentarily from 50—70 to 120—160 km with anomalous resistivity of 20—50 Ohm·m. Local objects in the Pripyat-Dnipro-Donetsk Depression have similar parameters. The Scythian Plate has anomalous areas: crustal mantle (30—40 to 60 km deep with a resistivity of 10 Ohm·m) and upper mantle (60—90 km deep with a resistivity of 100 Ohm·m). In the Carpathian region, the asthenosphere is heterogeneous, probably consisting of regions that differ in resistivity and may branch with

depth. A general deepening of its upper boundary to the northeast from 40 to 90—100 km has been confirmed.

Key words: electromagnetic research, resistivity, asthenosphere, models of different geological and tectonic regions of Ukraine.

References

- Burakhovich, T., & Kushnir, A. (2023). History, current state and future prospects of geoelectromagnetic research in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(100), 58—66. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.07> (in Ukrainian)
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilienکو, V., & Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *European Association of Geoscientists & Engineers. Geoinformatics* (Vol. 2021, pp. 1—6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116>.
- Lin, W., Yang, B., Han, B., & Hu, X. (2023). A Review of Subsurface Electrical Conductivity Anomalies in Magnetotelluric Imaging. *Sensors*, 23(4), 1803. <https://doi.org/10.3390/s23041803>.
- Selway, K. (2014). On the Causes of Electrical Conductivity Anomalies in Tectonically Stable Lithosphere. *Surveys in Geophysics*, 35, 219—257. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9235-1>.
- Unsworth, M., & Rondenay, S. (2013). Mapping the distribution of fluids in the crust and lithospheric mantle utilizing geophysical methods. In *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock* (pp. 535—598). Berlin-Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_13.