

# Інтерпретація 3D геоелектричної моделі Кочерівської структури Українського щита

**В.А. Ільєнко, Т.К. Бурахович, А.М. Кушнір, 2024**

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна  
Надійшла 27 травня 2024 р.

Виконано інтерпретацію 3D моделі Кочерівської структури Українського щита, що побудована за даними експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі в широкому діапазоні періодів, проведених Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Основним результатом геолого-геоелектричної інтерпретації є те, що Кочерівський синклінорій у його геологічних межах не проявився як суцільна електропровідна структура; виявлено нові аномалії низького опору у приповерхневій частині земної кори (від поверхні до глибини 0,5—2 км), які відповідають структурним й металоґенічним особливостям, простягаються вздовж Віленського та Кочерівського розломів, що належать до Звіздаль-Заліської зони розломів, і Вільшанського (Брусилівська зона розломів) та їх перетину з Центральною зоною розломів; підтверджено аномально неоднорідний розподіл питомого опору у земній корі на глибинах від 15 до 30 км заходу Українського щита. Опір вмісних порід становить у середньому 10 000 Ом·м, поширюється майже на всю потужність земної кори до глибини 50 км, що просторово добре узгоджується з масивами гранітів житомирського та фастівського комплексів Волинського та Росинського мегаблоків щита. Природа аномалії електропровідності може бути результатом транспортування рудних компонентів разом з флюїдами із кори та мантії під час тектономагматичної активізації, що дає можливість прогнозувати ділянки, перспективні на ендегенне зруденіння як проєкції глибинних аномалій на денну поверхню.

Встановлено зв'язок між ендегенними зруденіннями у межах Кочерівської структури і низькоомними аномаліями. Зони глибинних розломів, до яких тяжіють низькоомні аномалії, потребують подальшого вивчення, наприклад, субширотна аномалія вздовж Машоринського розлому. Як перспективні для пошуку корисних копалин за геоелектричними критеріями виділено аномалії на півночі Кочерівської структури у вузлі перетину Кочерівського та Глухівського розломів і південніше в межах найглибшого (від поверхні до глибини 2 км) приповерхневого субширотного провідника, який просторово збігається з Комарівською субширотною зоною розломів.

**Ключові слова:** геоелектромагнітні методи, інтерпретація тривимірної моделі, аномалії електропровідності, рудопрояви корисних копалин, Український щит, Кочерівська структура, зони розломів.

**Постановка проблеми.** Загальна сума збитків, яку Росія завдала Україні, захопивши її родовища, становить 12 трильйонів доларів США. Це понад 60 % вугільних родовищ, 11 % — нафтових, 20 % — газових, а також понад 40 % покладів металів, 33 % родовищ рідкісноземельних елементів та інших важливих корисних копалин, у тому числі літію, — уточнює Washington Post [Faiola, Bennett, 2022]. Тому проблема

Citation: *Ilyenko, V.A., Burakhovych, T.K., & Kushnir, A.M. (2024). Interpretation of the 3D geoelectrical model of the Kocheriv structure of the Western Ukrainian Shield. Geofizychnyi Zhurnal, 46(4), 81—93. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i4.304895>.*

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

пошуку рудопроявів і родовищ корисних копалин в Україні і, особливо у воєнний та повоєнний час, вимагає нових підходів, що полягають в осмисленні нагромадженого матеріалу, виявленні закономірностей формування і розміщення прогнозованого зруденіння, а головне, виділення площ, перспективних для подальших пошукових і геологорозвідувальних робіт на підставі геолого-геофізичних моделей.

Останні десятиліття ознаменувалися швидким розвитком геофізичних методів, що ґрунтуються на використанні електромагнітного поля Землі [Berdichevsky, Dmitriev, 2008]. Методи магнітотелуричного зондування (МТЗ) і магнітоваріаційного профілювання (МВП) набули значного прогресу, зокрема розширилися сфери їх застосування. Одним із принципово нових напрямів можна виділити (в комплексі з іншими геофізичними методами) пошук і розвідку родовищ твердих корисних копалин [Chen et al., 2009; Spratt et al., 2009; Unsworth, Rondenay, 2012; Adetunji et al., 2015; Бурахович и др., 2015; Neska, 2016; Wang et al., 2017; Curtis, Thiel, 2019]. Здебільшого за електричними параметрами гірських порід, що складають верхню частину розрізу, виявляють рудопрояви завдяки метасоматичним змінам навколорудних порід — графітизації, сульфідизації, озалізнення та окварцювання. Практично усі родовища та рудопрояви, зокрема великі та унікальні, локалізуються у зонах глибинних розломів, у межах їх перетинань чи поблизу них; саме там, де широко виявлений прирозломний метасоматоз, що супроводжується низькоомними аномаліями майже на всю глибину розрізу.

Наприклад, у результаті магнітотелуричних досліджень західної частини архейського кратону Слейв на Канадському щиті [Spratt et al., 2009] виділено дві аномалії провідності: одна — неглибока (<2 км) з позірним опором ( $\rho_{\text{п}}$ ) 10 Ом·м знаходиться на границі метаседиментаційних відкладів і кислих магматичних гірських порід, інша — з максимальним  $\rho_{\text{п}}$  10 Ом·м до глибини 10 км, занурюється на схід не менш як на 30 км і просторово збігається із зоною роз-

ломів (ЗР) Вест-Бей-Індін (West-Bay-Indin), провідність якої пов'язують із сульфідною мінералізацією. Опір вмісних порід земної кори становить в середньому 10 000 Ом·м. Також дослідженнями у південній частині кратону Голер (Gawler), в межах півострова Ейр (південна Австралія), методом МТЗ [Curtis, Thiel, 2019] виявлено серію провідників ( $\rho_{\text{п}}$  від 10 до 100 Ом·м), які відповідають глибинним розломам: на сході півострову Ейр — від середини земної кори до нижньої частини поділу Мохо — під розломом Роопена; у центрі — з поверхні до поділу Мохо — із системою розломів на поверхні, таких як Кемел Хіл (Camel Hill), Пікакс (Pickaxe), Джангл Дам (Jungle Dam) та Шол Пойнт (Shoal Point); на заході — від поверхні до поділу Мохо — розломи Мелалука (Melaleuca) та Алалоне (Allalone), з'єднується із струмопровідною зоною в нижній корі.

Використання результатів геоелектричних досліджень для прогнозування рудопроявів корисних копалин в межах Українського щита (УЩ) та їх зв'язку з глибинними аномаліями високої електропровідності розглянуто у багатьох публікаціях авторів, передусім узагальнюючих [Белявский и др., 2001; Бурахович и др., 2015, Бурахович та ін., 2022]. В основі системи критеріїв регіонального та локального прогнозу закладено ідею, що умови та зони формування корисних копалин, а також їх мінералогенічна спеціалізація визначаються не тільки глибинною геологічною будовою, хімічним складом і фізичним станом елементів літосфери, а й динамікою земної кори та верхньої мантії [Старостенко и др., 2011, Шеремет и др., 2013]. До геоелектричних критеріїв [Шеремет и др., 2013] можна віднести: низькоомні аномалії як регіональні, так і локальні; наявність глибинних аномалій вздовж протяжних зон розломів та приурочених до зон метасоматозу; спряженість низькоомних аномалій з металогенічними рудними вузлами та геохімічними аномаліями.

При вивченні будови УЩ електромагнітними методами та подальшому 3D моделюванні [Бурахович и др., 2015, Бурахович

та ін., 2022] було виявлено субвертикальні низькоомні аномалії уздовж протяжних зон розломів, таких як Брусилівська, Звенигородсько-Братська, Суботсько-Мошоринська, Тальнівська, Первомайська, Кіровоградська, Західноінгулецька, Криворізько-Кременчуцька, Азово-Павлоградська, Центрально-Приазовська, Грузько-Еланчицька та інші. Генезис аномалій підвищеної електропровідності на глибинах до 2,5 км обумовлений наявністю асоціації мінералів (сульфідів, графіту) в зонах метасоматично перетворених порід, що приводить до утворення рудної мінералізації (уран, золото, рідкісні метали); в земній корі на глибині 5—30 км і верхах верхньої мантії — 50—120 км, найімовірніше, відповідає особливому складу порід або впливу сучасних мантійних флюїдів. Останнім часом часто припускають комбінацію електроннопровідних включень унаслідок графітизації та флюїду, що пов'язаний з процесами окиснення водню та вуглеводнів, які виділяються при дегазації мантії та утворюють гальванічну мережу провідних каналів і глибинні аномальні ділянки високої електропровідності. Саме над глибинними коровими аномаліями УЩ виявлені численні рудопрояви і родовища.

**Аналіз публікацій за темою досліджень.** Огляд уявлень про глибинну геоелектричну будову за попередніми регіональними [Белявский и др., 2001; Бурахович, Кулик, 2009] і сучасними синхронними електромагнітними спостереженнями вздовж серії профілів поперек Кочерівської структури: I — Макарівський, II — Радомишль—Фастів, III — Фастівський та IV — Корнинський (рисунок, а), подано в публікаціях [Геолого-геофизическая ..., 2009; Бурахович и др., 2015; Ніколаєв та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019]. У посиланнях наведено параметри регіональної тривимірної моделі Чернівецько-Коростенської аномалії та зон підвищеної електропровідності, які часто пов'язані з ендегенним зруденінням [Бурахович и др., 2015]. Останні дослідження вздовж двох субширотних I та III профілів [Ніколаєв та ін., 2019] показали дуже високі значення  $\rho_{\text{п}}$  — від 1000 до 5000 Ом·м

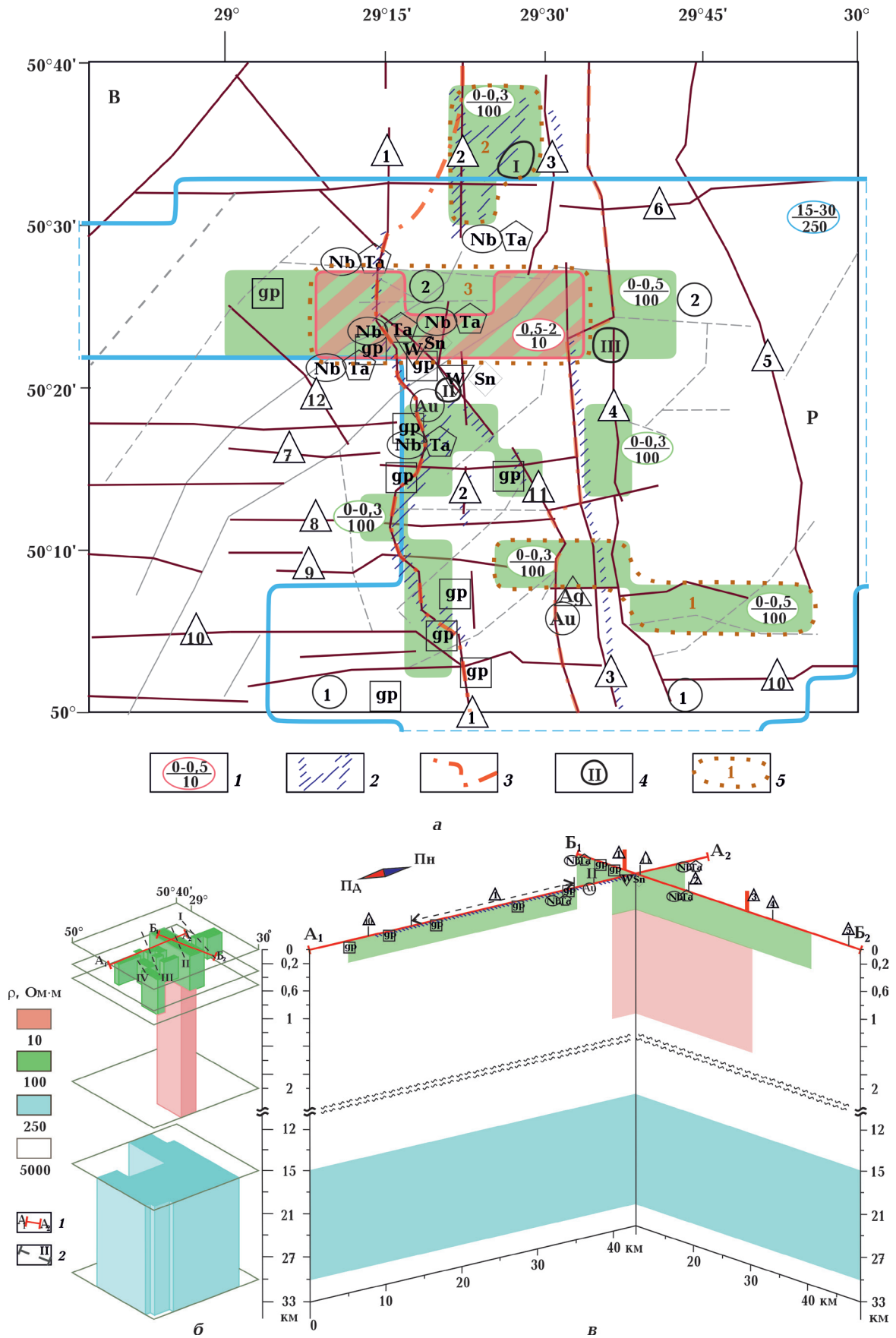
у Волинському та <1000 Ом·м у Росинському мегаблоках УЩ. Звіздаль-Заліська та Брусилівська ЗР проявляються у вигляді контактів різних  $\rho_{\text{п}}$  — 5000 і 1000 Ом·м, 1000 і 300 Ом·м відповідно. Центральна зона розломів, Огієвський, Погребищенський, Кочерівський, Старосельський, Великоєрчиківський, Віленський і частково Вільшанський розломи утворюють низькоомні аномалії (до 300, іноді до 500 Ом·м) у всьому частотному діапазоні.

За результатами польових досліджень методами МТЗ і МВП (профілі II і IV) [Ільєнко та ін., 2019] якісно оцінено електропровідність Кочерівської структури — припущено існування локальних низькоомних аномалій ( $\rho_{\text{п}}$  від 100 до 250 Ом·м), які мають різне простягання і глибину залягання (поверхневі, приповерхневі, глибинні), що вказує на складну геолого-тектонічну будову земної кори та наявність яскравих аномалій, які збігаються з глибинними розломами УЩ: Віленським, Кочерівським, Погребищенським, Брусилівським, Великоєрчиківським та іншими.

За аналізом нової глибинної тривимірної моделі розподілу питомого опору ( $\rho$ ) у земній корі та верхній мантії в центральній частині Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР УЩ [Бурахович та ін., 2022] виявлено зв'язки між низькоомними аномаліями та структурними і металогенічними особливостями зон розломів. Геолого-геоелектричний аналіз моделі дав можливість уперше виділити дві перспективні для подальшого вивчення ділянки, які відповідають геоелектричним критеріям пошуку корисних копалин: уздовж Звіздаль-Заліської ЗР між Самгородським та Унавським розломами; уздовж Самгородського розлому в зоні його перетину з Кочерівським і Таборівським розломами.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** За останні десятиліття методи геоелектрики зазнали значного прогресу:

– у підвищенні розподільчої здатності для глибин перших кілометрів, чому сприяв розвиток високоточної і компактної апаратури [Пристай и др., 2014], відсут-





ність громіздких штучних джерел електромагнітного поля;

– стрімкий розвиток синхронних систем спостереження (пригнічення завад);

– прогрес у методах обробки сигналів, наприклад, за допомогою програмного комплексу PRC-MTMV, що забезпечує спільне перешкодозахищене оцінювання імпедансу та комплексних індукційних параметрів за синхронними МТ/МВ записами;

– 3D інтерпретація експериментальних даних [Maskie, Booker, 1999], а саме дослідження особливостей будови земної кори та верхньої мантії на підставі тривимірної моделі розподілу  $\rho$ .

Район досліджень для геологів- і геофізиків-практиків є об'єктом неординарним. Багато дискусій щодо нього розглянуто у публікаціях [Державна ..., 2003; Кореляційна ..., 2004; Тектонічна ..., 2007; Геолого-геофізическая ..., 2009; Карли та ін., 2015; Гінтов та ін., 2018; Мичак та ін., 2022]. Ста-

новить інтерес саме те, що такий концентровано потенційний на корисні копалини район до кінця ще не освоєний в рудному аспекті.

**Мета даного** дослідження — продовження геолого-геоелектричної інтерпретації тривимірної моделі розподілу електроного опору [Бурахович та ін., 2022], що побудована за експериментальними даними МТЗ і МВП; висвітлення фізико-геологічної будови земної кори Кочерівської структури на заході УЩ і тлумачення природи аномалій високої електропровідності.

**Тектоно-геоелектрична будова Кочерівської структури.** По всьому периметру Волинського мегаблока існують специфічні крайові структурні елементи. Так, Кочерівський синклінорій має меридіональне простягання, що збігається з напрямком східної границі мегаблока, що ймовірно, вказує на її пристосування до обмеження сусіднього підняття — Росинського мега-

← Розподіл питомого електричного опору в земній корі за результатами 3D моделювання Кочерівської структури УЩ; *a* — аномалії електропровідності на тектонічній схемі за даними [Державна ..., 2003]: 1 — параметри аномалії електропровідності (над рискою — інтервал глибин, км, під рискою —  $\rho$  за моделлю, Ом·м); 2 — зони метасоматозу; 3 — контур Кочерівської структури; 4 — рудоносні поля (I — Білківське (W, Au, Ag), II — Кочерівське (Ta, Nb, Be, Li, Rb, Cs, Au), III — Безіменне (U-Mo-Bi-Th-TR)); 5 — ділянки, перспективні для подальшого вивчення (1) та пошуку корисних копалин (2, 3); *мегаблоки УЩ*: P — Росинський, B — Волинський. *Зони розломів* (цифри в кружках): 1 — Андрушівська, 2 — Комарівська, 3 — Центральна. *Розломи* (цифри в трикутниках): 1 — Віленський, 2 — Кочерівський, 3 — Брусилівський, 4 — Вільшанський, 5 — Макарівський, 6 — Глухівський, 7 — Коростишівський, 8 — Житомирський, 9 — Машоринський, 10 — Андрушівський, 11 — Старосільський.

Рудопрояви корисних копалин (літери): вольфрам (W), олово (Sn), ніобій (Nb), тантал (Ta), золото (Au), срібло (Ag), графіт (gp).

Вертикальний зріз 3D моделі розподілу питомого опору вздовж інтерпретаційних профілів (*b*); 3D геоелектрична модель земної кори (*b*): 1 — інтерпретаційний профіль; 2 — профіль пунктів спостереження МТЗ і МВП: I — Макарівський, II — Радомишль—Фастів, III — Фастівський, IV — Корнинський за даними [Геолого-геофізическая ..., 2009; Бурахович и др., 2015; Ніколаєв та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019].

Distribution of specific electrical resistance in the earth's crust according to the results of 3D modeling of the Kocherivsk structure of the Ush: *a* — electrical conductivity anomalies on the geological-tectonic map of the surface of the crystalline basement according to [State ..., 2003]: 1 — parameters of electrical conductivity anomaly (numerator — depth interval, km, denominator —  $\rho$  according to the model,  $\Omega\cdot m$ ); 2 — zones of metasomatism; 3 — contour of the Kocherivska structure; 4 — ore-bearing fields (I — Bilkivske (W, Au, Ag), II — Kocherivske (Ta, Nb, Be, Li, Rb, Cs, Au), III — Bezimenny (U-Mo-Bi-Th-TR)); 5 — promising areas for further study (1) and promising for mineral exploration (2, 3), *Ush Domain*: P — Ros', B — Volyn. *Fault zones (numbers in circles)*: 1 — Andrushivska, 2 — Komarivska, 3 — Central. *Faults (numbers in triangles)*: 1 — Vilensky, 2 — Kocheriv, 3 — Brusyliv, 4 — Vilshansky, 5 — Makariv, 6 — Glukhiv, 7 — Korostyshiv, 8 — Zhytomyr, 9 — Masherynsk, 10 — Andrushivka, 11 — Starosilsky.

Minerals are shown by letters: tungsten (W), tin (Sn), niobium (Nb), tantalum (Ta), gold (Au), silver (Ag), graphite (gp).

A vertical section of the 3D model of the distribution of specific resistance along the interpretation profiles (*b*); 3D geoelectrical model of the earth's crust (*b*): 1 — interpretive profiles; 2 — profiles of observation points of MTZ and MVP: I — Makariv, II — Radomyshl-Fastiv, III — Fastiv, IV — Kornynsky, according to data [Antsiferov, 2009; Burakhovych et al., 2015; Nikolaev et al., 2019; Ilyenko et al., 2019].

блока, та на компенсаційний характер прогинання [Тектонічна ..., 2007]. На заході Кочерівська структура межує з Коростишівським антиклінорієм теж субмеридіонального простягання. Вона обмежена зі сходу Вільшанським і Брусилівським, а із заходу — Віленським і Кочерівським розломами (див. рисунок, б, в).

Аналіз тривимірної моделі розподілу  $\rho$  [Бурахович та ін., 2022] показав, що Кочерівський синклінорій у його геологічних межах не проявився як суцільна електропровідна структура (див. рисунок). Чіткої визначеності у геофізичних полях також не існує, але однозначно виділяються глибинні розломи всередині зони і розломи, що її обмежують. Зроблено висновок [Геолого-геофизическая ..., 2009, с. 240], що «найімовірніше за все, неодноразові колізії у докембрії зашифрували її відмінні ознаки, залишивши тільки глибинні розломи як репери їхнього довгого життя (прояви різновікового базальтового магматизму й метасоматозу) та характерний гранітоїдний магматизм, що охоплює період від 2,8 до 1,7 млрд років».

Виявлені приповерхневі аномалії низького опору ( $\rho=100$  Ом·м) припадають саме на глибини до 500 м і простягаються вздовж частин здебільшого субмеридіональних розломів та їх перетинів, таких як Віленський, Кочерівський, Центральний і Вільшанський в межах синклінорію (див. рисунок).

Віленський розлом має в плані звивисту форму, змінюючи напрямок простягання у межах площі поширення розповсюдження гранітних масивів житомирського комплексу та відділяючи їх від Кочерівської структури. Аномалії електропровідності (від поверхні до глибини 300 м) також утворюють подібний за формою розлому ланцюг із загальною видовженістю до 30 км за ширини від 5 до 10 км між вузлами його перетину з Коростишівським розломом та Андрушівською ЗР. Збільшення ширини спостерігається на півночі, де аномалія круто розвертається на південний схід та збігається з частиною Центрального розлому. Розломи маркуються пластовими

тілами графітових гнейсів, а також спостерігаються тектонітові шви, заповнені катаклазитами і мілонітами.

Основною розривною структурою синклінорію є однойменний Кочерівський розлом, який субмеридіонально перетинає її в центральній частині. Загальна протяжність розлому досягає 70 км, породи в межах структури дуже тектонізовані з розвитком усього різноманіття тектонітів (ширина від 1 до 5 км) — від тріщинуватих порід до мілонітів. З порушеннями Кочерівського розлому пов'язані прояви кремнієво-калієвого метасоматозу, спостерігаються глибокі лінійні кори вивітрювання, потужність яких у тектонічних вузлах становить 100—250 м. Як суцільна електропровідна аномалія цей розлом не проявився, винятком є його окремі частини: по-перше, приповерхнева ділянка (до глибини 300 м) майже ізометричної форми 10×15 км на півночі у вузлі перетину Кочерівського та Глухівського розломів; по-друге, південніше в межах найглибшого (від поверхні до 2 км) приповерхневого субширотного провідника.

На відміну від субмеридіональної орієнтації синклінорію останній провідник припадає на його найбільш широку частину в зонах перетинів Віленського та Кочерівського з Центральним, Вільшанського з Брусилівським розломами, а також зазначених вище розломів із серією субширотних розломів меншого порядку. Аномалія передбачається складнобудованою неоднорідною зоною: по-перше, характеризується зменшенням  $\rho$  — 100 Ом·м (від поверхні до глибини 500 м) та 10 Ом·м (глибше 500 м), по-друге, верхня частина (розмірами 10×60 км) виходить за межі Кочерівської структури, тоді як нижня — підковоподібна, розвернута на північ (10×30 км), розміщується майже повністю в її межах (див. рисунок, а, в). Слід зазначити, що аномалія просторово збігається з Комарівською субширотною ЗР, яка поділяє Кочерівський синклінорій на дві частини: північну, з перевернутим на схід західним крилом, та південну, з перевернутим на захід східним крилом [Державна ...,

2003]. Крім того, в межах аномалії у східній частині Кочерівської структури розташований Безіменний U-Mo-Vi-Th-TR рудопрояв. До Кочерівської тектонічної зони тяжіє велика кількість радіоактивних аномалій як у фундаменті, так й у корах вивітрювання [Карли та ін., 2015].

Східна границя синклінорію не так виразно проявлена в підвищеній електропровідності. Локальну ділянку (5×10 км) виявлено вздовж частини Вільшанського та Брусилівського розломів. Порооди останнього інтенсивно брекчіювані, катаклізовані, мілонітизовані та метасоматично перетворені (див. рисунок, в). Ще одна аномалія електропровідності субширотного простягання спостерігається вздовж Машоринського розлому (5×35 км). У середині Кочерівської структури її глибина сягає 300 м, на схід від Вільшанського розлому потужність збільшується до 500 м (див. рисунок, б, в).

Опір вмисних порід становить у середньому 5000 Ом·м, поширюється майже на всю потужність земної кори до глибини 50 км, що просторово добре узгоджується з масивами гранітів житомирського і фастівського комплексів Волинського та Росинського мегаблоків (див. рисунок, а, б).

Західна межа Кочерівської структури (вздовж Віленського розлому) збігається з внутрішньою субмеридіональною границею контакту низького ( $\rho=250$  Ом·м) і високого ( $\rho=5000$  Ом·м) опору регіональної Чернівецько-Коростенської аномалії електропровідності, вона ускладнена у зоні перетину з субширотними Машоринським розломом та Андрушівською ЗР (див. рисунок).

Тут металоґенічна обстановка має ґрунтуватися на головній ролі глибинних розломів, хоч і простежених за електромагнітними даними тільки у приповерхневій частині розрізу, але розташованих над суцільною глибинною короною аномалією в інтервалі глибин від 15 до 30 км, і на магматизмі, який на завершальному етапі був глибинним [Шеремет и др., 2013]. Зазначене підтверджується наявністю основних порід габро-анортозитового рапакі-

вігранітного коростенського комплексу і, отже, більш збагачених рудних компонентів, ніж типових палінґенних гранітів (житомирський комплекс).

Постачання рудних компонентів у складі мантійних флюїдів при утворенні родовищ нерозривно пов'язане з вертикальними і субвертикальними зонами руйнування гірських порід, які проявляються як зони ослаблення, розуцільнення, напруження і тріщинуватості. Подібні зони у будь-якому випадку пов'язані з ендегенними процесами, що відбуваються, або з геологічною історією розвитку останніх і спричинюють на великих глибинах підвищення питомої електричної провідності гірських порід.

Наприклад, у публікації [Усенко, 2024] розглянуто *PT*-умови утворення гранітів і метаморфізму порід Волинського мегаблока УЩ з огляду на роль флюїдів у гранітизації. Згідно з термодинамічним моделюванням утворення осередку часткового плавлення в корі на глибині 15 км пов'язане з кондуктивним прогрівом, спричиненим підшаровуванням кори ультраосновними розплавами. Підвищення градієнта цим осередком з 20 до 35 °С/км зумовлює метаморфізм, а надходження розплавів і розчинів по зонах деформацій — метасоматичні перетворення та формування мігматитів. Метаморфізм, деформації—перекристалізації, складчастість супроводжували існування осередку плавлення в корі.

Кочерівський синклінорій є основною структурою однойменної металоґенічної зони Волинської субпровінції архей-ранньопротерозойського формування [Державна ..., 2003]. Зона спеціалізована на талій, ніобій, літій, рубідій, вольфрам, олово, уран, срібло, золото, які широко представлені на площі геохімічними ореолами, точками мінералізації та рудопроявами. Ціла низка останніх пов'язана із проявом прирозломного метасоматозу (див. рисунок, б, в). Сам прирозломний метасоматоз виражений у вигляді проявів кварцсульфідних жил у вмисних породах, утвореннями польовошпатових метасоматитів, зонами скарнування і ґрейзенізації, приуроченими до субмеридіональних ЗР

— Кочерівської й Брусилівської та Віленського розлому.

Усі глибинні розломи, з огляду на вік приурочених до них рудопроявів, є довго існуючими. Так, рудопрояви нікелю у серпентинітах масивів юрлівського комплексу (верхній архей), витягнутих у вигляді субмеридіонального ланцюжка вздовж Кочерівської структури.

Найбільший інтерес становлять рудопрояви і родовища, що розміщуються у вузлах розривних порушень різного простягання. Рудоносні гранітні масиви та їх апікальні частини перебувають у найбільш ослабленому, легко проникному середовищі, тектонічна структура якого була вже підготовлена до моменту вкорінення магми, що зіграло вирішальну роль при формуванні зруденіння [Сьомка, 2012]. Група проявів вольфрам-молібденової мінералізації приурочена до вузла перетину Центральної й Коростишівської систем розломів першого і другого порядків. Тут зосереджений Кочерівський рудопрояв вольфраму скарнового типу та Білківський TR-Mo-Bi-U-Th рудопрояв.

До пегматитових жил у зонах ендоконтактів житомирських гранітів і апікальних частин масивів бистрівських гранітів (вік 2040—2100 млн років) приурочені рудопрояви з тантал-ніобієвою і берилієвою мінералізацією та, нарешті, до основних порід головної інтрузивної фази коростенського комплексу (вік 1784—1794 млн років) тяжіють титан-цирконієві рудопрояви. На тектонічній схемі північно-західної частини УЩ [Геолого-геофизическая ..., 2009, с. 175] у межах Кочерівської синклінальної структури точки Ti-Zr-рудопроявів і Ta-Nb-зруденіння тяжіють переважно до глибинних розломних зон — Звиздаль-Заліської (Віленської), Центральної та Брусилівської.

Отже, прогноз рудопроявів і родовищ ендегенного походження має бути спрямований насамперед на пошук площ уздовж зон глибинних розломів — найперспективніших у виявленні нових рудопроявів у межах Кочерівського синклінорію.

**Висновки.** Сучасні експериментальні геоелектромагнітні дослідження, що ґрун-

туються на вивченні природного низько-частотного змінного електромагнітного поля іоносферно-магнітосферного походження із застосуванням новітньої апаратури, обробка цих спостережень на підставі універсального програмного комплексу та інтерпретація даних для складнобудованих тривимірних середовищ забезпечили виявлення аномалій електропровідності та вивчення глибинної будови земної кори Кочерівської структури західної частини УЩ, її тектонічних особливостей, а також зон прояву геодинамічних процесів, що досліджені з точки зору формування та розміщення родовищ і рудопроявів корисних копалин.

Отримано численні дані щодо наявності у земних надрах глибинних аномалій електропровідності та просторового зв'язку їх з провінціями розвитку корисних копалин. Так, регіональна Чернівецько-Коростенська аномалія електропровідності частково збігається з Кірово-Кочерівською металогенічною зоною Волинської субпровінції архей-ранньо-протерозойського формування. Природа аномалії може бути результатом транспортування рудних компонентів разом з флюїдами із кори та мантиї під час тектономагматичної активізації, що дає можливість прогнозувати ділянки, перспективні на ендегенне зруденіння як проєкції глибинних аномалій на денну поверхню.

Встановлено зв'язок між ендегенними зруденіннями, що розміщуються в межах Кочерівської структури, і низькоомними аномаліями. Зони глибинних розломів, до яких приурочені низькоомні аномалії, є першочерговими для проведення пошукових робіт.

Геолого-геоелектричний аналіз моделі Кочерівської структури показав, що декілька ділянок потребують подальшого вивчення, а саме субширотна аномалія вздовж Машоринського розлому. Як перспективну для пошуку корисних копалин, яка відповідає геоелектричним критеріям [Шеремет и др., 2013], виділяються аномалії: 1) на півночі Кочерівської структури у вузлі перетину Кочерівського та Глу-



хівського розломів; 2) південніше в межах найглибшого (від поверхні до глибини 2 км) приповерхневого субширотного провідника, який просторово збігається з Комарівською субширотною зоною розломів. Публікація містить результати дослі-

джен, проведених за фундаментальною темою Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України № III-11-21: «Глибинна будова літосфери та процеси формування родовищ корисних копалин України і суміжних регіонів» (2021—2025 рр.).

### Список літератури

- Белявский В.В., Бурахович Т.К., Кулик С.Н., Сухой В.В. *Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины*. Киев: Знання, 2001, 227 с.
- Бурахович Т.К., Ільєнко В.А., Кушнір А.М. Тривимірна геоелектрична модель центральної частини Звездаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 5. С. 13—33. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i5.272325>.
- Бурахович Т.К., Кулик С.Н. Трехмерная геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии западной части Украинского щита и его склонов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 1. С. 88—99.
- Бурахович Т.К., Николаев И.Ю., Шеремет Е.М., Ширков Б.И. Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 6. С. 42—63. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111171>.
- Гінтов О.Б., Орлюк М.І., Єнтін В.А., Пашкевич І.К., Мичак С.В., Бакаржієва М.І., Шимків Л.М., Марченко А.В. Структура західної і центральної частин Українського щита. Спирні питання. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 6. С. 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>.
- Геолого-геофизическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита*. Под. ред. А.В. Анциферова. Донецк: Вебер, 2009. 254 с.
- Державна геологічна карта України масштабу 1:200000 аркуша М-35-ХVIII (Фастів)*. Київ: Геоінформ України, 2003.
- Ільєнко В.А., Кушнір А.М., Бурахович Т.К. Электромагнитні дослідження Звездаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 42. № 4. С. 97—113. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177370>.
- Карли З.В., Сьомка В.О., Степанюк Л.М., Бондаренко С.М., Карли В.Е., Сьомка Л.В. Геохімічні особливості кристалічних порід центральної частини Кочерівської западини (Український щит). *Геохімія та рудоутворення*. 2015. Вип. 35. С. 11—18. <https://doi.org/10.15407/gof.2015.35.011>.
- Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита. Пояснювальна записка*. Київ: УкрДГРІ, НСК України, 2004, 30 с.
- Мичак С.В., Бакаржієва М.І., Фарфуляк Л.В., Марченко А.В. Внутрішня будова і кінематика Звездаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита за результатами тектонофізичних і магнітометричних досліджень. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 1. С. 83—110. <https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253712>.
- Николаев И.Ю., Кушнір А.М., Ільєнко В.А., Николаев Ю.І. Электромагнітні дослідження західної частини Українського щита. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 3. С. 120—133. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433>.
- Пристай А.Н., Проненко В.А., Корепанов В.Е., Ладанівський Б.Т. Роль електрических измерений при глубинном магнитотеллурическом зондировании Земли. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 173—182. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111062>.
- Старостенко В.И., Гинтов О.Б., Кутас Р.И. Геодинамическое развитие литосферы Украины и его роль в формировании и размещении месторождений полезных ископаемых. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 3. С. 3—22. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011.116919>.

- Сьомка В.О. Генетичні типи молібдено- і вольфрамоносних метасоматитів Українського щита. *Геохімія та рудоутворення*. (2012). Вип. 31-32. С. 38—46. <https://doi.org/10.15407/gof.2012.31.038>.
- Тектонічна карта України. Масштаб 1:1000000. Частина II. Тектоніка фундаменту Українського щита. Масштаб 1:2000000. Пояснювальна записка*. Київ: Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Державна геологічна служба, Український державний геологорозвідувальний інститут, Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2007.
- Усенко О.В. Термодинамічні умови гранітизації та метаморфізму порід північно-західної частини Українського щита. *Геофиз. журн.* 2024. Т. 46. № 2. С. 34—52. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.294984>.
- Шеремет Е.М., Кривдик С.Г., Бурахович Т.К. *Критерии поисков руды в областях субдукции Украинского щита*. Saarbrücken, Deutschland. Germany. LAPLAMBERT Academic Publ., 2013, 418 с.
- Adetunji, A.Q., Ferguson, I.J., & Jones, A.G. (2015). Imaging the mantle lithosphere of the Precambrian Grenville Province: large-scale electrical resistivity structures. *Geophysical Journal International*, 201(2), 1040—1061. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv060>.
- Berdichevsky, M.N., & Dmitriev, V.I. (2008). *Models and Methods of Magnetotellurics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 563 p.
- Chen, C.W., Rondenay, S., Evans, R.L., & Snyder, D.B. (2009). Geophysical detection of relict metasomatism from an Archean (~3.5 Ga) subduction zone. *Science*, 326, 1089—1091. <https://doi.org/10.1126/science.1178477>.
- Curtis, S., & Thiel, S. (2019). Identifying lithospheric boundaries using magnetotellurics and Nd isotope geochemistry: An example from the Gawler Craton, Australia. *Precambrian Research*, 320, 403—423. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.11.013>.
- Faiola, A., & Bennett, D. (2022). In the Ukraine war, a battle for the nation's mineral and energy wealth. *Washington Post*. August 10, 2022. Retrieved from <https://www.washingtonpost.com/world/2022/08/10/ukraine-russia-energy-mineral-wealth/>.
- Mackie, R.L., & Booker, J. (1999). *Documentation for mtd3fwd and d3-to-mt*. GSY-USAInc., 2261 Market St., Suite 643, San Francisco, CA 94114.
- Neska, A. (2016). Conductivity Anomalies in Central Europe. *Surveys in Geophysics*, 37, 5—26. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9349-8>.
- Spratt, J.E., Jones, A.G., Jackson, V.A., Collins, L., & Avdeeva, A. (2009). Lithospheric geometry of the Wopmay orogen from a Slave craton to Bear Province magnetotelluric transect. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01101. <https://doi.org/10.1029/2007JB005326>.
- Unsworth, M.J., & Rondenay, S. (2012). Mapping the distribution of fluids in the crust and lithospheric mantle utilizing geophysical methods. In D.E. Harlov, H. Austrheim (Eds.), *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock* (pp. 535—598). Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_13).
- Wang, E., Unsworth, M., & Chacko, T. (2017). Geoelectric structure of the Great Slave Lake shear zone in northwest Alberta: implications for structure and tectonic history. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(3), 295—307. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0067>.

# Interpretation of the 3D geoelectrical model of the Kocheriv structure of the Western Ukrainian Shield

V.A. Ilyenko, T.K. Burakhovych, A.M. Kushnir, 2024

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

The interpretation of the 3D model of the Kocheriv structure of the Ukrainian Shield, based on the data of experimental observations of the low-frequency electromagnetic field of the Earth in a wide range of periods, was carried out by S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. The main result of the geological-geoelectrical interpretation is that the Kocheriv synclinorium within its geological limits did not appear as a solid conductive structure; new anomalies of low resistance were discovered in the near-surface part of the crust (from the surface to 0.5—2 km), which correspond to structural and metallogenic features, extend along the Vilensky and Kocheriv faults, which belong to the Zvizdal-Zaliska fault zone and the Vilshansky (Brusyliv fault zone) and their intersection with the Central fault zone; an abnormally heterogeneous distribution of resistivity in the crust at depths from 15 to 30 km west of the Ukrainian Shield was confirmed. The resistivity of the host rocks is on average 10,000  $\Omega\cdot\text{m}$ , it extends over almost the entire thickness of the crust up to 50 km, which spatially agrees well with the massifs of granites of the Zhytomyr and Fastiv complexes of the Volyn and Ros' Domain. The nature of the electrical conductivity anomaly may be the result of transport of ore components together with fluids from the crust and mantle during tectonic-magmatic activation, which allows predicting areas promising for endogenous mineralization as projections of deep anomalies to the day surface.

A connection between endogenous mineralization within the Kocheriv structure and low-resistivity anomalies was established. Zones of deep faults, to which low-resistivity anomalies are confined, require further study, such as the sublatitude anomaly along the Masheryn fault. Anomalies in the north of the Kocheriv structure at the intersection of the Kocheriv and Glukhiv faults and further south within the deepest (up to 2 km from the surface) near-surface sub-latitudinal conductor, which spatially coincides with the Komariv sub-latitudinal fault zone, stand out as promising for mineral exploration that meets geoelectrical criteria.

**Key words:** geoelectromagnetic methods, interpretation of a three-dimensional model, electrical conductivity anomalies, ore occurrences of minerals, Ukrainian Shield, Kocheriv structure, fault zone.

## References

- Belyavsky, V.V., Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Sukhoi, V.V. Electromagnetic methods in the study of the Ukrainian shield and the Dnieper-Donets depression. Kyiv: Zannanya, 2001, 227 p. (in Russian).
- Burakhovych, T.K., Ilyenko, V.A., & Kushnir, A.M. (2023). Three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskii Zhurnal*, 44(5), 13—33. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i5.272325> (in Ukrainian).
- Burakhovych, T.K., & Kulik, S.N. (2009). Three-dimensional geoelectric model of the earth's crust and upper mantle of the western part of the Ukrainian Shield and its slopes. *Geofizicheskii Zhurnal*, 31(1), 88—99 (in Russian).
- Burakhovych, T., Nikolaev, I., Sheremet, E., & Shirkov, B. (2015). Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral deposits. *Geofizicheskii Zhurnal*, 37(6), 42—63. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111171> (in Russian).

- Gintov, O.B., Orlyuk, M.I., Entin, V.A., Pashkevich, I.K., Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Shimkiv, L.M., & Marchenko, A.V. (2018). The structure of the Western and Central parts of the Ukrainian shield. Controversial issues. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(6), 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000> (in Ukrainian).
- Antsiferov, A.V. (Ed.). (2009). *Geological and geophysical model of the Nemirovsko-Kocherovskoy suture zone of the Ukrainian shield*. Donetsk: Weber, 254 p. (in Russian).
- State geological map of Ukraine, scale 1:200,000, sheet M-35-XVIII (Fastiv)*. (2003). Kyiv: Geoinform of Ukraine (in Ukrainian).
- Ilyenko, V.A., Kushnir, A.M., & Burakhovych, T.K. (2019). Electromagnetic studies of Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(4), 97—113. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177370> (in Ukrainian).
- Karly, Z.V., Syomka, V.O., Stepanyuk, L.M., Bondarenko, S.M., Karly, V.E., Syomka, L.V. (2015). Geochemical features of crystalline rocks of the central part Kocherivska depression (Ukrainian Shield). *Geochemistry and Ore Formation*, (35), 11—18. <https://doi.org/10.15407/gof.2015.35.011> (in Ukrainian).
- Correlative chronostratigraphic scheme of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Explanatory note*. (2004). Kyiv: UkrDGRI, NSK of Ukraine, 30 p. (in Ukrainian).
- Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Farfuliak, L.V., & Marchenko, A.V. (2022). The inner structure and kinematics of the Zvizdal-Zalisk and Brusyliv fault zones of the Ukrainian shield by the results of tectonophysical, magnetometrical data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 44(1), 83—110. <https://doi.org/10.24028/gzh.v44i1.253712> (in Ukrainian).
- Nikolaev, I.Y., Kushnir, A.M., Ilyenko, V.A., & Nikolaev, Y.I. (2019). Electromagnetic studies of the western part of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(3), 120—133. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433> (in Ukrainian).
- Pristay, A.N., Pronenko, V.A., Korepanov, V.E., & Ladanivskiy, B.T. (2014). Role of electrical measurements at deep magnetotelluric sounding of the Earth. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(6), 173—182. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111062> (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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(3), 3—22. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011.116919> (in Russian).
- Syomka, V.O. (2012). Genetic types of Mo and W metasomatites of Ukrainian shield. *Geochemistry and Ore Formation*, (31-32), 38—46. <https://doi.org/10.15407/gof.2012.31.038> (in Ukrainian).
- Tectonic map of Ukraine. Scale 1:1000000. Part II. Tectonics of the foundation of the Ukrainian seam. Scale 1:2 000000. Explanatory note*. (2007). Kyiv: Ministry of Environmental Protection of Ukraine, State Geological Service, Ukrainian State Geological Exploration Institute, Ivan Franko Lviv National University (in Ukrainian).
- Usenko, O.V. (2024). Thermodynamic conditions of granitization and metamorphism of rocks in the northwestern part of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(2), 34—52. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.294984> (in Ukrainian).
- Sheremet, E.M., Krivdik, S.G., & Burakhovych, T.K. (2013). Criteria for ore exploration in the subduction areas of the Ukrainian Shield. Saarbrücken, Germany. LAPLAMBERT Academic Publ., 418 p. (in Russian).
- Adetunji, A.Q., Ferguson, I.J., & Jones, A.G. (2015). Imaging the mantle lithosphere of the Precambrian Grenville Province: large-scale electrical resistivity structures. *Geophysical Journal International*, 201(2), 1040—1061. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv060>.
- Berdichevsky, M.N., & Dmitriev, V.I. (2008). *Models and Methods of Magnetotellurics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 563 p.
- Chen, C.W., Rondenay, S., Evans, R.L., & Snyder, D.B. (2009). Geophysical detection of relict metasomatism from an Archean (~3.5 Ga) subduction zone. *Science*, 326, 1089—1091. <https://doi.org/10.1126/science.1178477>.
- Curtis, S., & Thiel, S. (2019). Identifying litho-



- spheric boundaries using magnetotellurics and Nd isotope geochemistry: An example from the Gawler Craton, Australia. *Precambrian Research*, 320, 403—423. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.11.013>.
- Faiola, A., & Bennett, D. (2022). In the Ukraine war, a battle for the nation's mineral and energy wealth. *Washington Post*. August 10, 2022. Retrieved from <https://www.washingtonpost.com/world/2022/08/10/ukraine-russia-energy-mineral-wealth/>.
- Mackie, R.L., & Booker, J. (1999). *Documentation for mtd3fwd and d3-to-mt*. GSY-USAInc., 2261 Market St., Suite 643, San Francisco, CA 94114.
- Neska, A. (2016). Conductivity Anomalies in Central Europe. *Surveys in Geophysics*, 37, 5—26. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9349-8>.
- Spratt, J.E., Jones, A.G., Jackson, V.A., Collins, L., & Avdeeva, A. (2009). Lithospheric geometry of the Wopmay orogen from a Slave craton to Bear Province magnetotelluric transect. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01101. <https://doi.org/10.1029/2007JB005326>.
- Unsworth, M.J., & Rondenay, S. (2012). Mapping the distribution of fluids in the crust and lithospheric mantle utilizing geophysical methods. In D.E. Harlov, H. Austrheim (Eds.), *Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock* (pp. 535—598). Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28394-9_13).
- Wang, E., Unsworth, M., & Chacko, T. (2017). Geoelectric structure of the Great Slave Lake shear zone in northwest Alberta: implications for structure and tectonic history. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(3), 295—307. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0067>.