

УДК 550.372/373+551.24.055
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.04>

В. Ільєнко, канд. геол. наук
e-mail: ivageophysicist@gmail.com

Т. Бурахович, д-р геол. наук,
e-mail: burahovich@ukr.net

А. Кушнір, д-р геол. наук
e-mail: antonnn@ukr.net

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
просп. Академіка Палладіна 32, м. Київ, 03680, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ 3D ГЕОЕЛЕКТРИЧНОЇ МОДЕЛІ РАЙОНУ ПЕРЕТИНУ ЗВІЗДАЛЬ-ЗАЛІСЬКОЇ ТА НЕМИРІВСЬКОЇ ЗОН РОЗЛОМІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Проведено геолого-геоелектричну інтерпретацію півдня глибинної тривимірної геоелектричної моделі центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита, побудованої із залученням даних експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, отриманих у 2019 р. Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України вздовж профілів Ординці-Побачів та Зозів-Стрижавка. Експериментальні матеріали опрацьовано за допомогою сучасного програмного комплексу PRC_MTMV, отримані оцінки типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3400 с, а також криві амплітудних значень позірної питомого електричного опору і фаз імпедансу в діапазоні періодів від 10 до 10000 с та виконане 3D моделювання глибинного розподілу питомого електричного опору. За результатами виконаного моделювання і якісного аналізу параметрів магнітоваріаційного профілювання та кривих магнітотелуричного зондування й псевдорозрізів позірної опору виділено декілька локальних приповерхневих структур складної орієнтації у просторі, які приурочені до: Погребищенського та Огіївського розломів; окремих частин Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської зон розломів (ЗР) та їх сходження; областей кристалічного масиву Українського щита за межами зон розломів.

Основним результатом геолого-геоелектричної інтерпретації 3D моделі є виявлення нових аномалій низького опору у приповерхневій частині земної кори (від поверхні до 0,5–2 км), які відповідають структурним та металогенічним особливостям території дослідження; підтвердження й деталізація аномально неоднорідного розподілу питомого опору у верхах верхньої мантії на глибинах від 70 до 120 км заходу Українського щита. Район перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської зон розломів характеризується як гальванічно зв'язаною різноорієнтованою у просторі системою аномалій електричного опору, так і локальними окремими приповерхневими аномаліями з низьким опором від 5 до 100 Ом·м, більшість яких простежується на глибину до 0,5–1 км.

Показано, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської і Немирівської зон розломів. Крім того, деякі аномалії знаходяться в граніт-мігматитах росинської структурно-формаційної зони поза межами тектоно-метасоматичних мінералізаційних зон. Аномалії переважно приурочені до зон дезинтеграції порід кристалічного фундаменту, видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітізованих порід. Частина поверхневих аномалій відповідає областям кори вивітрювання. Проведений геолого-геоелектричний аналіз моделі показав, що декілька ділянок потребують подальшого вивчення, а саме – субширотна аномалія на захід від профілю Зозів-Стрижавка та аномалія складної форми у східній частині району дослідження. Ділянку, перспективну за геоелектричними критеріями для пошуку корисних копалин, можна виділити в межах аномалії провідності, яка має глибинне продовження до 2 км і розташована в Брусилівській зоні розломів.

Ключові слова: геоелектромагнітні методи, інтерпретація тривимірної моделі, аномалії електропровідності, рудопошук корисних копалин.

Постановка проблеми. Поміж основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих наук приділено увагу вивченню глибинної будови літосфери методами геофізики з метою пошуку корисних копалин. Електромагнітні поля, індуковані в Землі низькочастотними джерелами природного зовнішнього походження, дають змогу отримати унікальну інформацію про глибинну геологічну будову Землі, а також перебіг фізико-хімічних процесів у її надрах. Більшість об'єктів пошуку в рудній та структурній геоелектриці зазвичай є складними тривимірними, тому сучасним засобом аналізу та інтерпретації даних має бути тривимірне моделювання. Аномалії електропровідності розглядаються як один із провідних факторів, що визначає можливі зони прояву геодинамічних процесів, а тому повинні бути досліджені з погляду можливого формування та розміщення родовищ корисних копалин.

У багатьох випадках геоелектромагнітні методи можуть виступати як засоби прямого пошуку масивів рудних об'єктів із підвищеною електропровідністю (Berdichevsky and Dmitriev, 2008; Smith, 2014). Просторове розташування рудопроявів переважно має стійкий зв'язок з певними тектонічними зонами (Khoza et al., 2013; Autio et al., 2020; Lilley et al., 2001; Бурахович и др., 2015; Bologna et al., 2014). Особливий інтерес становлять області перетину

двох глибинних зон розломів (ЗР), як зони підвищеної провідності для флюїдів, а отже як зони, перспективні на рудоутворення (Begg et al., 2010).

Аналіз публікацій за темою досліджень. За новими експериментальними магнітотелуричними (МТ) та магнітоваріаційними (МВ) даними, отриманими Інститутом НАН України у період з 2009 по 2019 р. (Анциферова, 2009; Бурахович та ін., 2015; Николаев та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019, 2020), побудовано глибинну тривимірну модель розподілу питомого опору в земній корі та верхній мантії центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР Українського щита (УЩ) (Бурахович та ін., 2022). Установлено, що існують зв'язки між низькоомними аномаліями електропровідності та структурними й металогенічними особливостями ЗР.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена висвітленню повного циклу МТ/МВ досліджень – від експериментальних спостережень, їх обробки і якісної інтерпретації до аналізу тривимірної глибинної моделі надр та її фізико-геологічного тлумачення для району перетину Звіздаль-Заліської і Немирівської ЗР. Слід відзначити досить складні геоелектричні умови досліджень, які пов'язані з природною обстановкою, а саме, малою товщиною осадових відкладів зі значеннями сумарної повздовжньої

провідності від 0,5 до 5 См та з окремими ділянками, де кристалічні породи виходять на денну поверхню. З одного боку, вивчення такого слабо диференційованого приповерхневого геоелектричного розрізу потребує підвищеної точності експериментальних вимірювань, з іншого, ускладнюють дослідження значні техногенні завади, що можуть бути викликані промисловими об'єктами, електрифікованими залізничними дорогами та іншими техногенними факторами. Загалом це потребує як застосування сучасної методики синхронного спостереження МТ/МВ полів з використанням двох довгоперіодних цифрових апаратурних комплексів серії LEMI-417, які є досить ефективними технічними засобами для глибинних електромагнітних зондувань земної кори і верхньої мантії, так і нових підходів до обробки й інтерпретації польових геоелектричних даних.

Мета – дослідження особливостей будови земної кори та верхньої мантії на основі тривимірної моделі розподілу електричного опору, побудованої за експериментальними даними магнітотелуричного зондування (МТЗ)

і магнітоваріаційного профілювання (МВП); пояснення природи аномалій високої електропровідності за геолого-геоелектричною інтерпретацією моделі у зв'язку з пошуком перспективних на корисні копалини структур у районі перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської ЗР.

Експериментальні спостереження. У 2019 р. було проведено синхронні спостереження електромагнітного поля Землі в широкому діапазоні періодів (T) уздовж двох профілів (рис. 1): Ординці-Лобачів (пр. 1 ORD – LBC) та Зозів-Стрижавка (пр. 2 ZZB – STR). Перший профіль із заходу на схід перетинає Подільський і Росинський, другий – Бузький і Росинський мегаблоки УЩ. Найзахідніший пункт ZZV розташований у Немирівській ЗР, яка в цьому місці є міжмегаблоковою (Gintov et al., 2018). Загалом виміри проведено у 12 пунктах, відстань між якими становить у середньому 10–15 км, спостереження в польових точках велися від 1 до 3 діб. У переважній більшості пунктів отримано кондиційні 5-компонентні записи електромагнітного поля, синхронні із записами на ще одній польовій точці.

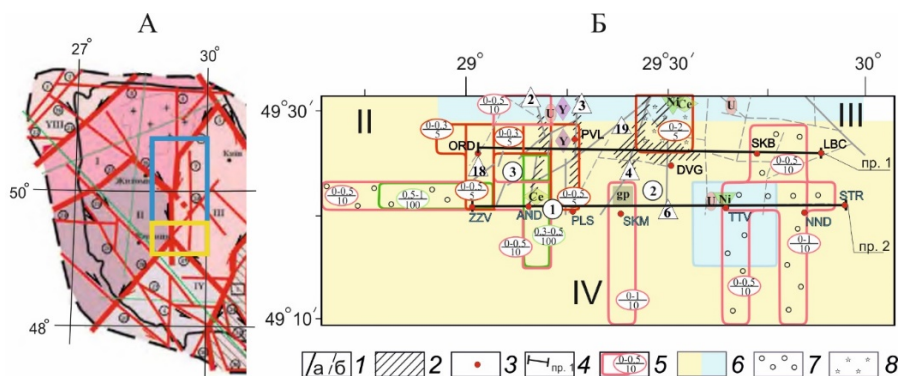


Рис. 1. Південна частина ((49°15' – 49°35' пн.ш.) × (28°45' – 30° зх.д.)) тривимірної моделі Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів (Бурахович та ін., 2022):

А – фрагмент схеми мегаблоків УЩ за даними (Gintov et al., 2018), де синім прямокутником показана площа 3D геоелектричної моделі (Бурахович та ін., 2022), жовтим – південний фрагмент цієї моделі, який описується в цій статті;
Б – геолого-тектонічна карта поверхні кристалічного фундаменту за даними (Державна..., 2005).
Мегаблоки УЩ: I – Волинський, II – Подільський, III – Росинський, IV – Бузький; 1 – глибинні та головні розломи (а), інші тектонічні порушення (б); 2 – зони метасоматозу; 3 – пункти спостереження МТЗ та МВП; 4 – інтерпретаційні профілі: пр. 1 – Ординці-Лобачів, пр. 2 – Зозів-Стрижавка; 5 – параметри аномалій електропровідності в земній корі за результатами тривимірного моделювання електромагнітного поля: числівник – інтервал глибин (км), знаменник – ρ згідно з моделлю (Ом·м); 6 – аномально неоднорідна верхня мантія на глибинах від 70 до 120 км з ρ : жовтий колір – 50 Ом·м, синій – 250 Ом·м; 7 – ділянки, що потребують подальшого вивчення; 8 – ділянка, перспективна для пошуку корисних копалин; зони розломів, позначені цифрами в кружках: 1 – Звіздаль-Заліська, 2 – Брусилівська, 3 – Немирівська; розломи, позначені цифрами в трикутниках (нумерація відповідає рис. 1 статті (Бурахович та ін., 2022)): 2 – Огіївський, 3 – Погребищенський, 4 – Кочерівський, 6 – Великоерчиківський, 18 – Таборівський, 19 – Павлівський; корисні копалини показано буквами: нікель (Ni), церій (Ce), ітрій (Y), уран (U), графіт (gr)

Обробку експериментальних даних проведено за допомогою програмного комплексу PRC-MTMV, що забезпечує спільне захищене від завад оцінювання імпедансу й комплексних індукційних параметрів за синхронними МТ/МВ-записами. Було отримано оцінки типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3400 с (рис. 2) та кривих позірної опору (ρ_n) і фаз імпедансу (φ) для періодів від 10–20 до 10000 с (рис. 3).

МВП. Згідно із співвідношеннями Візе просторова орієнтація типперів така, що дійсний типпер (VEC_{Re}) у широкому інтервалі достатньо низьких частот направлений від зони високої електропровідності до зони низької електропровідності. Одночасно на двох профілях спостерігається така орієнтація VEC_{Re} : в інтервалі періодів $T < 400$ с у пунктах ORD, PVL, ZZV, AND, PLS та SKM –

південь (іноді південний схід), у решті пунктів – південний-захід, захід; в інтервалі періодів $T > 400$ с у першій групі пунктів спостережень – південний-захід, захід, у другій групі – захід. Максимальні значення VEC_{Re} досягають значень 0,3 – 0,4 (іноді 0,5) і спостерігаються в періодах біля 250 с. Із збільшенням T вони знижуються до рівня, меншого за 0,1. Значення уявного типперу (VEC_{Im}) лежать у межах 0,1 – 0,5 і здебільшого є меншими за VEC_{Re} , кут між дійсним та уявним типперами варіює від 90° до 180°. У поодиноких випадках незалежно від T спостерігаються значно більші за 0,5–1 значення VEC_{Re} або VEC_{Im} . Такі дані вважалися похибками (похибка встановлена під час обробки у програмному комплексі PRC-MTMV) і в подальшому не використовувались при інтерпретації.

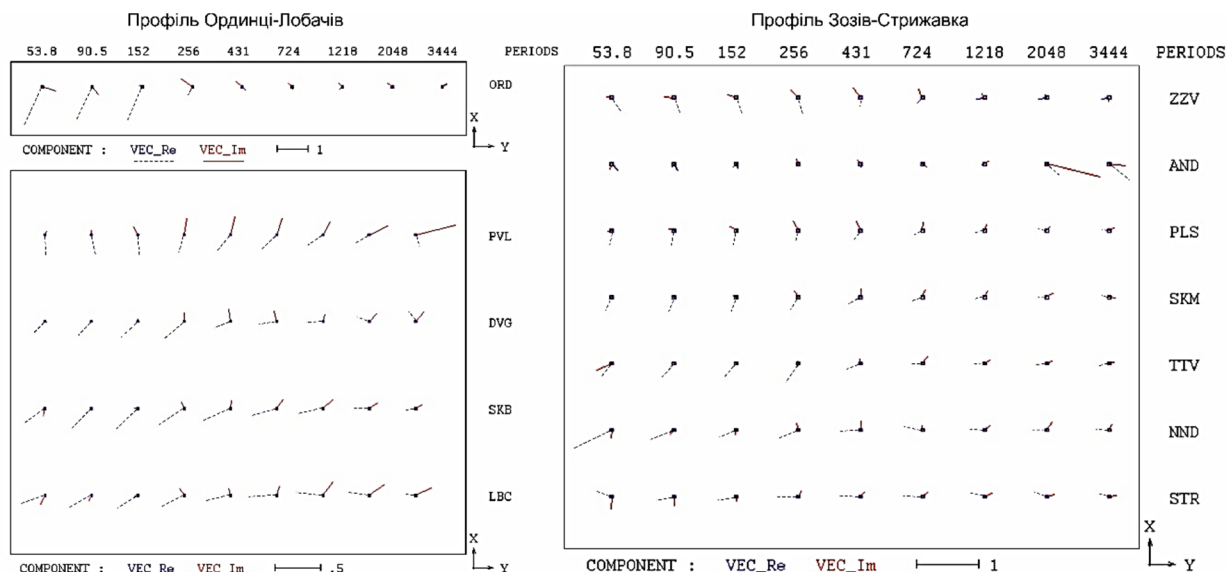


Рис. 2. Спостережені типпери МВП уздовж профілів Ординці-Лобачів та Зозів-Стрижавка, отримані з використанням програми PRC-MTMV:
VEC_Re – дійсні (синій колір) та VEC_Im – уявні (червоний колір)

МТЗ. Амплітудні і фазові криві МТЗ, отримані в пунктах району досліджень, зображено на рис. 3. Незважаючи на сучасні підходи обробки, деякі криві МТЗ в широкому діапазоні періодів ($T > (3-5) \cdot 10^3$ с) отримано зі значним розкидом за позірним опором ρ_n (подекуди декілька порядків). Відомо, що при $T > 10^3$ с спостерігається значна дисперсія значень ρ_n і фази ϕ_z . Мала амплітуда варіацій природного електромагнітного поля в цьому діапазоні періодів зумовлює нестійкість визначення імпедансу, що відповідно спричинює низьку точність оцінок позірного опору і фази. В окремих пунктах (ORD і DVG, NND і STR) суттєвий розкид значень ρ_n і ϕ_z наявний майже в усьому частотному діапазоні (останні два пункти спостережень розташовані за межами ЗР у кристалічних масивах), що пов'язано із значним впливом техногенних завад на точність визначення імпедансу.

Виділяється кілька особливостей поведінки в більшості кривих МТЗ. Насамперед помітні істотні гальванічні впливи на рівень імпедансу в усьому вимірюваному діапазоні T геомагнітних варіацій (він переважно вищий за характерний для глобальних даних), які викликані поверхневими провідними локальними тривимірними неоднорідностями. Крім того, в інтервалі періодів $T > 2 \cdot 10^2$ с спостерігаються розбіжності ρ_n біля одного порядку залежно від просторової орієнтації вимірювальних ліній, при цьому співвідношення між ρ_{xy} та ρ_{yx} залишається однаковим майже в усьому частотному діапазоні (за винятком пункту SKB, TTV). Загальний рівень ρ_n багатьох амплітудних кривих МТЗ лежить у межах від 10^2 до 10^3 Ом·м. Характерною особливістю кривих позірного опору є наявність на них декількох незначних мінімумів ρ_n в діапазоні T від 10^2 до 10^3 с.

Фазові криві ϕ_z не завжди відповідають амплітудним, а самі значення фаз змінюються в широкому інтервалі. Так, для $T < 1000$ с фази лежать у межах від -40° до -70° , зі збільшенням періоду коливань вони переважно мають більші (за модулем) значення – від -50° до -80° і лише в пунктах AND і SKM прямують до -90° , що може вказувати на наявність глибинного провідника. Як зазначалось вище, у пунктах ORD і DVG, NND і STR якість записів низька, отже параметри обробки, отримані на цих пунктах спостережень, важко піддаються інтерпретації.

Хоча обробка записаних варіацій МТ поля з використанням програмного комплексу PRC_MTMV дозволяє отримувати діаграми передавальних операторів поля, візуалізація результатів обробки здійснювалася лише в системі координат північ-південь – схід-захід. Це пов'язано з тим, що зміни геоелектричних параметрів краще проявляються в перпендикулярному до простягання геологічних структур напрямку, а в межах ділянки досліджень тектонічні структури переважно витягнуті в субмеридіональному (уздовж осі x) напрямку.

Відомо, що набори псевдорозрізів – карт ізоліній найбільш інформативних компонент функцій відгуку, побудованих у вертикальній площині профілю спостережень з глибинним продовженням періоду коливань T , дають можливість наочного відображення отриманих результатів, особливо в разі виділення на профілях досліджень локальних зон високої електропровідності. У зв'язку із цим уздовж обох профілів були побудовані псевдорозрізи спостережених позірних опорів для різних поляризацій поля ρ_{xysp} і ρ_{yxsp} , а також фази ефективного імпедансу $\phi(\text{еф})$ (рис. 4а, б).

Профіль Ординці-Лобачів (пр. 1). На псевдорозрізах позірного опору (рис. 4а) між пікетами 0–25 км у пунктах ORD і PVL проявляються знижені значення ρ_n від перших десятків до 200 Ом·м (для поляризації ρ_{xy}) та 200–500 Ом·м (для поляризації ρ_{yx}). Пункт PVL просторово розташований у межах Погребищенського глибинного розлому, а саме – у зоні перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської ЗР. Встановлені "відносно" низькі значення ρ_{yx} від 100 до 500 Ом·м у межах пікетів 50–65 км (навколо пункту SKB). Значення $\phi(\text{еф})$ загалом уздовж профілю не є аномальними. Єдиний виняток становить інтервал профілю поміж пікетами 50 і 55 км, який характеризується підвищеними значеннями фази, зокрема у пункті SKB $\phi(\text{еф})$ більша за -75° .

Профіль Зозів-Стрижавка (пр. 2). Псевдорозрізи ρ_n уздовж профілю Зозів-Стрижавка (рис. 4а) характеризуються постійною зміною співвідношення позірних опорів ρ_{xy} та ρ_{yx} . Їх знижені значення від перших одиниць до менших за 500 Ом·м (для поляризації ρ_{xy}) та менші за 1000 Ом·м (для поляризації ρ_{yx}) проявилися вздовж профілю на пікетах від 10 до 33 км (в пунктах AND, PLS,

SKM) у зоні зближення Звіздаль-Заліської з Брусилівською ЗР, південніше перетину з Немирівською ЗР. У межах останньої розташований пункт ZZV (пікет 0 км), у якому на довгих та коротких періодах отримані низькі значення ρ_{yx} (від перших десятків до < 500 Ом·м). Амплітудні криві MT3 різної поляризації в пункті TTV (пікет 45 км) розходяться за рівнем і в значному діапазоні періодів відповідають значенням $\rho_{xy} \approx 1000$ Ом·м, $\rho_{yx} \approx 200$ Ом·м. Навколо пункту NND (біля пікету 60 км) проявилася локальна аномальна зона, у якій на коротких періодах рівень значень ρ_n лежить у межах від 75 до 500 Ом·м. На псевдорозрізі $\Phi(\text{еф})$ у діапазоні періодів $T > 4000$ с спостерігається висока електропровідність навколо пункту AND, приуроченого до Огіївського глибинного розлому, що добре узгоджується з низькими значеннями позірного опору у околі цього ж пункту на псевдорозрізі ρ_{xy} .

Виходячи з короткого опису параметрів МБП, кривих MT3 та їх псевдорозрізів, можна виділити декілька локальних приповерхневих структур складної орієнтації у просторі (рис. 16). Зокрема, уздовж профілю 1 Ординці-Лобачів такі структури проявилися в околі пунктів ORD, PVL і SKB, водночас в околі пункту PVL структура приурочена до Погребищенського розлому. Уздовж профілю 2 Зозів-Стрижавка зафіксовано декілька зон підвищеної провідності: в інтервалі пікетів 0–33 км (зона сходження Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської ЗР) з максимальною провідністю в пункті AND, приуроченого до Огіївського глибинного розлому; в околі пункту SKM – окрема аномалія, приурочена до Брусилівської ЗР; в околі пункту NND – аномалія за межами ЗР у кристалічному масиві.

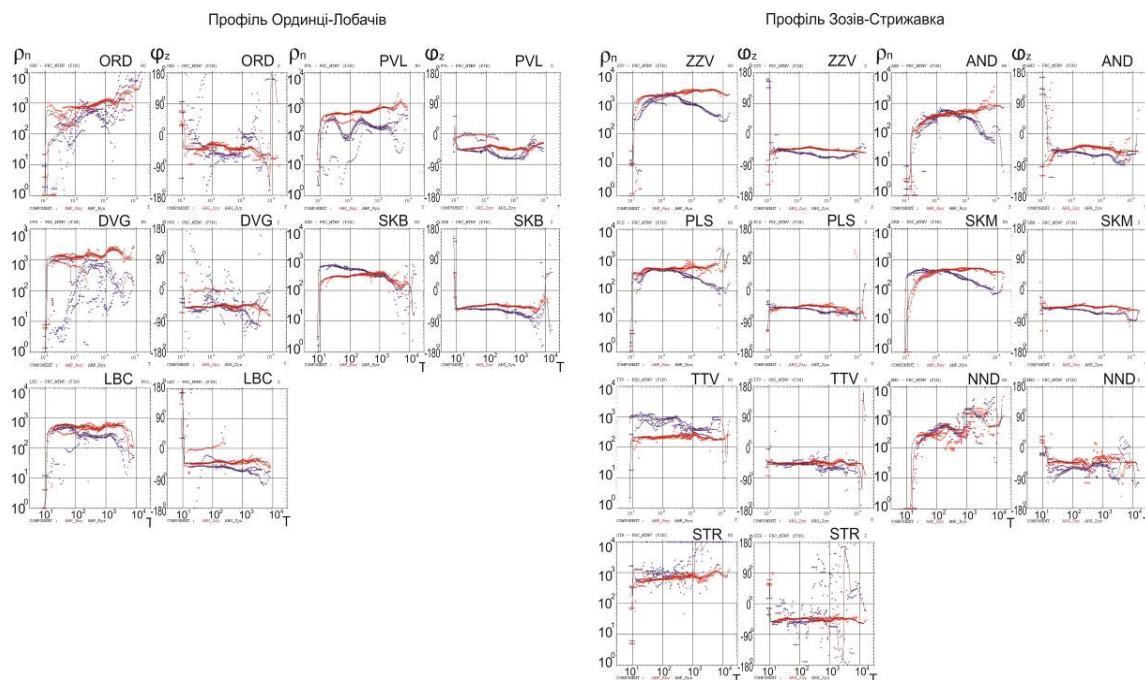


Рис. 3. Амплітудні (ρ_n) і фазові (ϕ_z) криві MT3 уздовж профілів Ординці-Лобачів та Зозів-Стрижавка:

Вертикальна шкала – ρ_n (Ом·м) і ϕ_z (градус), горизонтальна – T (секунди);

криві ρ_{xy} (поляризація північ-південь) позначено синім кольором, криві ρ_{yx} (поляризація схід-захід) позначено червоним кольором

Аналіз та геолого-мінералогічна інтерпретація тривимірної геоелектричної моделі. З метою з'ясування глибинної будови складної в геоелектричному сенсі зони зчленування трьох мегаблоків західної частини Українського щита (Волинського, Подільського та Росинського) створено тривимірну геоелектричну модель центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів (рис. 1А) у межах планшета (49°15'–50°40' пн.ш.)×(28°45'–30° зх.д.) (Бурахович та ін., 2022). Проаналізуємо південну частину побудованої моделі в контурах (49°15'–49°35' пн.ш.)×(28°45'–30° зх.д.).

На рис. 4 показано зіставлення спостережених псевдорозрізів ρ_n вздовж профілів 1 і 2 (рис. 4а, б), побудованих за результатами обробки експериментальних даних, з аналогічними псевдорозрізами (рис. 4г) геоелектричної тривимірної моделі, яка представлена розрізами питомого опору (ρ) вздовж профілів (рис. 4в). Більшість із багатьох приповерхневих аномалій з низьким ρ від 5 до 100 Ом·м простежується на глибину до 0,5–1 км, і тільки одна аномалія простежується на глибину до 2 км. Згідно з геоелектричною моделлю виділені об'єкти переважно є складовою частиною аномалій уздовж протяжних ЗР і

доповнюють поперемінні в просторі зони високого і низького опору різної орієнтації. Спостерігаються зв'язки між областями аномально високої електропровідності, проявленими на фоні нормального розрізу в земній корі ($\rho=1000$ Ом·м), і структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської ЗР.

Профіль 1. У межах планшета загальна протяжність профілю становить близько 65 км. На заході профіль проходить у Подільському мегаблоці (пікети 0–15 км), у подальшому на схід до кінця профілю – у Росинському (рис. 1). Східна частина першої вздовж профілю приповерхневої аномалії (пікети 0–20 км) приурочена до перетину Немирівської та Звіздаль-Заліської ЗР (пікети 6–20 км). Ця зона високої провідності починається на відстані близько 7 км від початку профілю, має субширотне простягання, характеризується низькими значеннями питомого опору ($\rho=5$ Ом·м) та глибиною залягання 300–500 м (рис. 4в). Місця максимального занурення аномальної області відповідають перетинам з провідниками субмеридіональної орієнтації, приуроченими до зон перетину Таборівського й Павлівського з Огіївським і Погребищенським розломами.

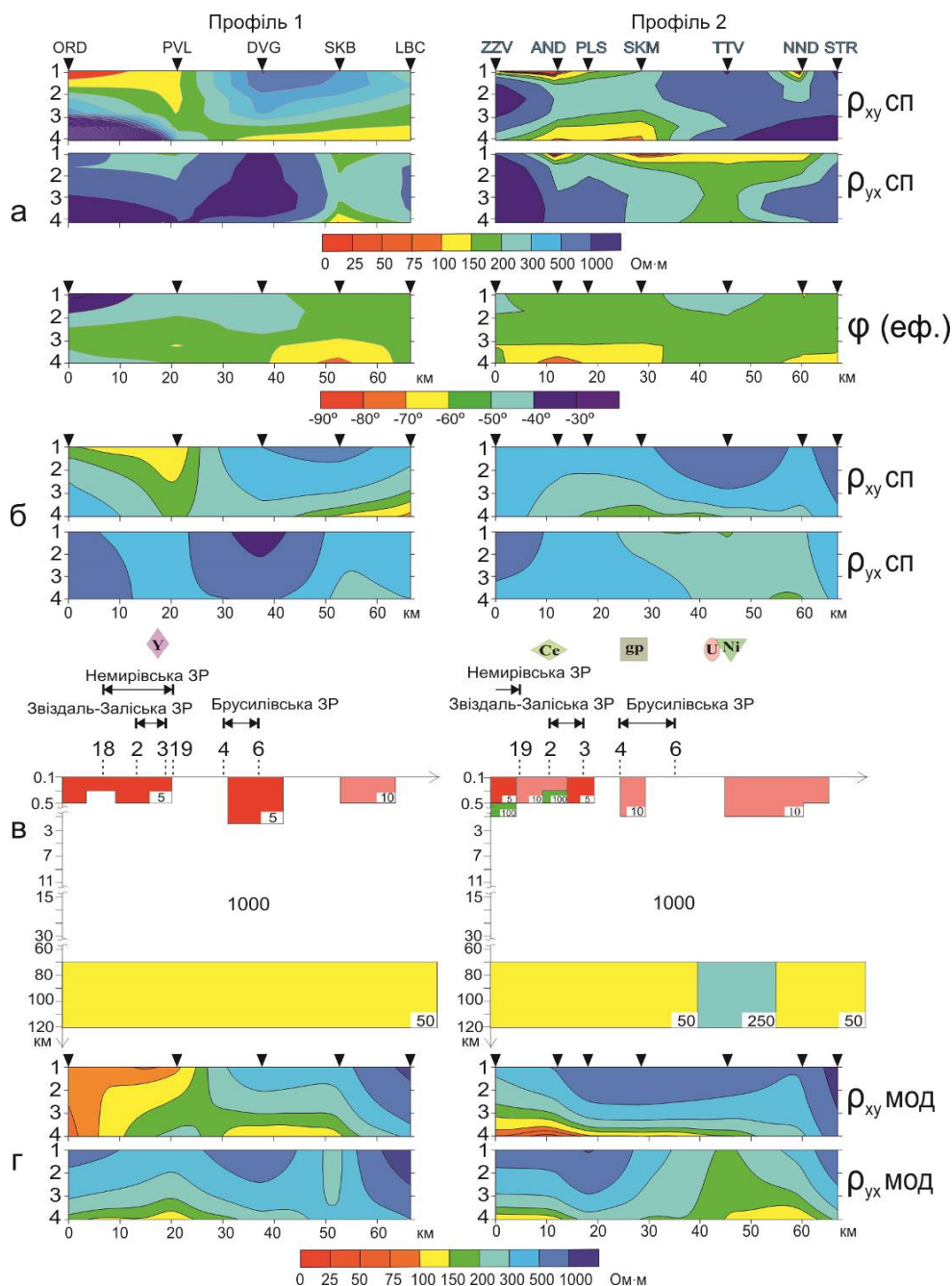


Рис. 4. Геолого-геоелектрична інтерпретація тривимірної моделі вздовж пр. 1 та пр. 2:

- а – псевдорозрізи розподілу спостережених ρ_n (поляризація: північ-південь – ρ_{xy} , схід-захід – ρ_{yx}) і $\varphi_{(еф)}$ (вертикальна шкала в логарифмічному масштабі) для T від 10 до 10000 с; б – псевдорозрізи розподілу спостережених ρ_n (вертикальна шкала – періоди $T=10, 100, 1000, 10000$ с у логарифмічному масштабі); в – розрізи розподілу питомого опору ρ тривимірної моделі; г – псевдорозрізи ρ_n , побудовані за результатами моделювання (вертикальна шкала – періоди $T=10, 100, 1000, 10000$ с у логарифмічному масштабі).
Ум. позн. рудопроївів і номери розломів див. на рис. 1

У межах аномалії електропровідності розташоване Погребищенське рудне поле (49° 27' пн. ш. і 29° 15' сх.д.), де присутні рудопрояви ітрію (Державна..., 2005). Рудопрояви присутні в корі вивітрювання гранітів уманського комплексу та графітізованих амфіболітах росинсько-тікецької серії. Також тут є прояви урану, пов'язані з пегматитами уманського комплексу, які приурочені до перетину Немирівської ЗР і Погребищенського розлому.

Наступна приповерхнева аномалія, яку профіль перетинає в її південній частині (пікети 30–40 км), локалізована в межах Брусилівської ЗР, характеризується однорідним низьким питомим опором ($\rho=5$ Ом·м) і простежується до

глибини 2 км. У середині аномалії розташовані Кочерівський та Великоєрчиківський розломи, яким притаманний прирозломний метасоматоз, який зазвичай пов'язаний із зонами металогенічних рудних полів. У даному випадку аномалія є частиною Брусилівської уран-благороднометальної мінерагенічної зони (Державна..., 2005). Рудопрояви нікелю виявлені біля с. Каленна (49° 30' пн. ш. і 29° 30' сх.д.), де оконтурені три масиви з коралями вивітрювання серпентинітів (Анциферова, 2009).

Остання вздовж профілю приповерхнева аномалія лежить в інтервалі пікетів 53–63 км. Вона характеризується зниженим питомим опором ($\rho=10$ Ом·м) і продовжується

на глибину до 500 м (рис. 4в). Північна складна за формою частина цієї аномальної області приурочена до зони перетину різнонаправлених локальних розломів. На сьогодні відсутня будь-яка апіорна інформація про зв'язок даної аномалії з рудопроявами, але важливою є та обставина, що аномалія зосереджена в межах Білоцерківського каолініт-уран-рідкоземельного району (Державна..., 2005). У подальшому цей район потребує додаткових геофізичних досліджень.

Профіль 2 також, як і профіль 1, має протяжність близько 65 км, перетинаючи Бузький (пікети 0–20 км) та Росинський мегаблоки (рис. 1). Перші 20 км профілю (Бузький мегаблок) проходять через східну частину видовженої субширотної приповерхневої аномалії електропровідності загальними розмірами 45×5 км, у межах якої питомий опір змінюється від 5 до 100 Ом·м (рис. 4в). Глибинне продовження аномалії в її середній частині (західне закінчення профілю) збільшується до 1 км, а на крайових закінченнях зменшується до 500 м. Найнижчі значення ρ аномалії зосереджені на глибинах до 500 м. Павлівський та Погребищенський (меншою мірою Огіївський) розломи проявилися найбільш провідними частинами розгалуженої гальванічно пов'язаної системи субмеридіональних аномалій. У межах зони метасоматозу Огіївського розлому ділянка відповідає Брусилівській уран-благороднометалічній мінералізаційній зоні з наявними в ній рудопроявами церію (Державна..., 2005). Західна частина аномалії, яка знаходиться за межами профілю, потребує додаткових експериментальних спостережень з метою підтвердження й уточнення геоелектричної будови, отриманої за результатами тривимірного моделювання.

Кочерівський розлом як складова частина Брусилівської ЗР (пікети 25–30 км) проявився у вигляді провідної структури з питомим опором $\rho = 10$ Ом·м, яка простежується від поверхні на глибину до 1 км (рис. 4в). Здебільшого зони тектонічних порушень характеризуються низькими ρ порівняно із вмісними породами, завдяки метасоматичним змінам навколорудних порід, зокрема графітизації та ін. За геологічними даними (Яценко, 2008), стверджується існування на різних глибинах формацій із вмістом у них графіту, що дає підстави для припущення наявності зв'язку виявленої аномальної електропровідності із присутністю рудопоявів графіту (Державна..., 2005).

Ще одна приповерхнева аномалія електропровідності спостерігається вздовж профілю в інтервалі пікетів 45–63 км. Аномалія простежується від поверхні до глибини 1 км і має питомий опір $\rho = 10$ Ом·м (рис. 4в). Вона є субширотною складовою загальної аномалії складної конфігурації з кількома гілками різної орієнтації. Вся виявлена структура просторово не відповідає будь-якій тектонічній одиниці високого порядку, водночас в її межах присутні рудопояви нікелю та урану, також вона частково приурочена до Тетіївського уранорудного поля, не пов'язаного з тектоно-метасоматичними зонами (Державна..., 2005).

У "нормальному" глибинному геоелектричному розрізі УЩ середовище, що вміщує приповерхневі аномалії, має питомий опір $\rho \approx 1000$ Ом·м в інтервалі глибин до 160 км. Відмінність глибинної геоелектричної будови західної частини УЩ полягає в аномально неоднорідному розподілі питомого опору ($\rho = 50, 250$ Ом·м) у верхній частині верхньої мантії в інтервалі глибин від 70 до 120 км (рис. 1, 4в), який було підтверджено й уточнено тривимірним моделюванням (Бурахович та ін., 2022). Отримані результати глибинних електромагнітних досліджень підтверджують особливість глибинної будови цього регіону

УЩ, раніше встановлену глибинними сейсмічними дослідженнями вздовж VI геотраверсу. Результатами цих глибинних сейсмічних зондувань встановлено, що Бузький мегаблок має структуру куполоподібного підняття, що простежується по межі Мохо, у верхній мантії та в самій середній земній корі (Ільченко і др., 1988).

Висновки. Дані експериментальних геоелектромагнітних спостережень, проведених Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України у 2019 р., було опрацьовано за допомогою сучасного програмного комплексу PRC_MTMV, що забезпечує спільне завадозахищене оцінювання імпедансу за синхронними магнітотелуричними записами. Надійно отримані оцінки типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3400 с та криві позірної питомого електричного опору (амплітудні криві) і фаз імпедансу для періодів від 10 до 10000 с були використані при побудові глибинної тривимірної моделі розподілу питомого опору в земній корі та верхній мантії. Геолого-геоелектрична інтерпретація отриманої моделі дозволила виявити:

- нові аномалії високої електропровідності у приповерхневій частині земної кори, які відповідають структурним та металогенічним особливостям території дослідження;
- підтвердити та деталізувати аномально неоднорідний розподіл питомого опору у верхах верхньої мантії.

Район перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської зон розломів характеризується як гальванічно зв'язаною різноорієнтованою в просторі системою провідних зон, так і локальними окремими приповерхневими аномаліями з низьким питомим опором від 5 до 100 Ом·м, більшість яких простежується до глибин 0.5–1 км.

Показано, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської зон розломів. Крім того, деякі аномалії виявляються в граніт-мігматитах росинської структурно-формаційної зони поза межами тектоно-метасоматичних мінералізаційних зон. Аномалії електропровідності приурочені переважно до зон дезінтеграції порід кристалічного фундаменту, видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітизованих порід, водночас частина поверхневих аномалій відповідає областям кір вивітрювання.

Проведений геолого-геоелектричний аналіз моделі показав, що декілька ділянок потребують подальшого вивчення, а саме – субширотно аномалія на захід від профілю Зозів-Стрижавка та аномалія складної форми у східній частині району робіт.

Аномалію, яка виділяється в межах Брусилівської зони розломів і простежується до глибини 2 км, за геоелектричними критеріями можна вважати перспективною для пошуку корисних копалин.

Список використаних джерел

- Анциферова, А.В. (Ред.). (2009). Геолого-геофізическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита. Донецк: Вебер.
- Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Шеремет, Е.М., Ширков, Б.И. (2015). Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых. *Геофизический журнал*, (6), 42–63.
- Бурахович, Т.К., Ільченко, В.А., Кушнір, А.М. (2022). Тривимірна геоелектрична модель центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофизический журнал*, 44 (4).
- Державна геологічна карта України масштабу 1:200000 аркуша М-35-XXIV (Сквира). (2005). Київ: Геоінформ України.
- Гітов, О.Б., Орлюк, М.І., Ентін, В.А., Пашкевич, І., Мичак, С.В., Бакаржієва, М.І., Шимків, Л.М., Марченко, А.В. (2018). Структура західної і центральної частин Українського щита. Спірні питання. *Геофизический журнал*, 40 (6), 3–29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>
- Ільченко, Т.В., Сологуб, Н.В., Трипольский, А.А., Чекунов, А.В. (1988). Литосфера Центральной и Восточной Европы: Географеры IV, VI, VIII. Киев: Наук. думка.

Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2019). Електромагнітні дослідження Звіздаль-Запільської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофізичний журнал*, 41 (4), 97–113. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177370

Ільєнко, В., Бурахович, Т., Кушнір, А., Попов, С., Омельчук, О. (2020). МТ/МВ дослідження в зоні ендоконтакту Корнінського гранітного масиву. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 88 (1), 46–52. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07

Николаев, І.Ю., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А., Николаев, Ю.І. (2019). Електромагнітні дослідження західної частини Українського щита. *Геофізичний журнал*, 41 (3), 120–133. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433

Яценко, В. Г. (2008). Геология, минералогия и генезис графита украинского щита. Киев: Логос.

Autio, U.A., Smirnov, M.Y., Smirnova, M., Bauer, T.E. (2020). Magnetotelluric array in the central Finnish Lapland II: 3-D inversion and tectonic implications. *Tectonophysics*, 794:228574. DOI:10.1016/j.tecto.2020.228574

Begg, G., Hronsky, J., Arndt, N. et al. (2010). Lithospheric, cratonic and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. *Economic Geology*, 105, 1057–1070.

Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Berlin Springer-Verlag Heidelberg.

Bologna, M., Padilha, A.L., Pádua, M.B., Vitorello, I., Chamalaun, F.H. (2014). Paraguay-Araguaia Belt Conductivity Anomaly: A fundamental tectonic boundary in South American Platform imaged by electromagnetic induction surveys. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15 (3), 509–515. DOI:10.1002/2013GC004970

Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensoopust, M.P., Webb, S.J. (2013). Lithospheric structure of an Archean craton and adjacent mobile belt revealed from 2-D and 3-D inversion of magnetotelluric data: Example from southern Congo craton in northern Namibia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (8), 4378–4397.

Lilley, F.E.M., Wang, L.J., Chamalaun, F.H., Ferguson, I.J. (2001). The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate. *GSA Monograph*, 201, 1–16.

Smith, R. (2014). Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012. *Surveys in Geophysics*, 35, 123–156.

References

Antsiferov, A.V. (Eds.). (2009). Geological and geophysical model Nemirovskaya-Kocharovskaya suture zone of the Ukrainian Shield. Donetsk: Weber. [in Russian]

Autio, U.A., Smirnov, M.Y., Smirnova, M., Bauer, T.E. (2020). Magnetotelluric array in the central Finnish Lapland II: 3-D inversion and tectonic implications. *Tectonophysics*, 794:228574. DOI:10.1016/j.tecto.2020.228574

Begg, G., Hronsky, J., Arndt, N. et al. (2010). Lithospheric, cratonic and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. *Economic Geology*, 105, 1057–1070.

Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Berlin Springer-Verlag Heidelberg.

V. Iliencko, PhD (Geol.)

e-mail: ivageophysicist@gmail.com

T. Burakhovich, Dr. Sci. (Geol.)

e-mail: burakhovich@ukr.net

A. Kushnir, Dr. Sci. (Geol.)

e-mail: antonn@ukr.net

Institute of Geophysics NAS of Ukraine,
32 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

Bologna, M., Padilha, A.L., Pádua, M.B., Vitorello, I., Chamalaun, F.H. (2014). Paraguay-Araguaia Belt Conductivity Anomaly: A fundamental tectonic boundary in South American Platform imaged by electromagnetic induction surveys. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15 (3), 509–515. DOI:10.1002/2013GC004970.

Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., Shirkov, B.I. (2015). Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral occurrences. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37 (6), 42–63. [in Russian]

Burakhovych, T., Iliencko, V., Kushnir, A. (2022). Three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 44 (4). [in Ukrainian]

Geological state map of the crystalline base of the scale of 1:200 000. Sheet M-35-XXIV (Skvira), (2005). Kyiv: Foundation of GP "Ukrainian Geological Company". [in Ukrainian]

Gintov, O.B., Orluk, M.I., Entin, V.A., Pashkevich, I., 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]

Ilchenko, T.V., Sologub, N.V., Tripolsky, A.A., Chekunov, A.V. (1988). Lithosphere of Central and Eastern Europe: Geographers IV, VI, VIII. Kyiv: Nauk. dumka. [in Russian]

Ilyenko, V., Burakhovich, T., Kushnir, A., Popov, S., Omelchuk, O. (2020). Magnetotelluric and magnetovariate researches in the endocontact area of Kominsky granite array. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 88(1), 46–52. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07 [in Ukrainian]

Ilyenko, V.A., Kushnir, A.M., Burakhovich, 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]

Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensoopust, M.P., Webb, S.J. (2013). Lithospheric structure of an Archean craton and adjacent mobile belt revealed from 2-D and 3-D inversion of magnetotelluric data: Example from southern Congo craton in northern Namibia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (8), 4378–4397.

Lilley, F.E.M., Wang, L.J., Chamalaun, F.H., Ferguson, I.J. (2001). The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate. *GSA Monograph*, 201, 1–16.

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]

Smith, R. (2014). Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012. *Surveys in Geophysics*, 35, 123–156.

Yatsenko, V. G. (2008). Geology, mineralogy and genesis of graphite of the Ukrainian shield. Kyiv: Logos. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.11.22

INTERPRETATION OF THE 3D GEOELECTRICAL MODEL OF THE INTERSECTION AREA OF THE ZVIZDAL-ZALISKA AND NEMYRIVSK FAULT ZONES

The interpretation of the deep three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian shield, which was built with the involvement of data from experimental observations of the Earth's low-frequency electromagnetic field conducted in 2019 by the Institute of Geophysics named after S.I. Subotin of the National Academy of Sciences of Ukraine, within the Ordynsi-Lobachiv and Zoziv-Stryzhavka profiles was done. Experimental materials were processed with the PRC_MTMV software package, tipper estimates were obtained for periods of geomagnetic variations from 50 to 3400 s and curves of apparent resistivity (amplitude values and impedance phases) from 10 to 10000 s. Based on the qualitative analysis of magnetovariational profiling parameters, magnetotelluric sounding curves and pseudo-sections, several local near-surface structures of complex orientation in space were identified, which are confined to the Pogrebyschensky and Ogiivskyi faults, areas of separate parts of the Zvizdal-Zaliska, Brusyliv and Nemyriv fault zones, as well as their convergence, and outside the fault zones in the crystalline massive of the Ukrainian shield.

The main result of the geological-geoelectrical interpretation of the 3D model is the discovery of new anomalies of low resistivity in the near-surface part of the earth's crust (from the surface to 0.5–2 km), which correspond to the structural and metallogenic features of the study area; confirmation and detailing of the anomalously heterogeneous distribution of resistivity in the tops of the upper mantle at depths from 70 to 120 km west of the Ukrainian shield. The area of intersection of the Zvizdal-Zaliska and Nemyrivs fault zones is characterized by both a galvanically connected spatially diverse system and local separate near-surface anomalies with low resistivity from 5 to 100 Ohm-m, most of which dip to 0.5–1 km.

It is shown that there are connections between conductivity and structural features of the Zvizdal-Zaliska, Brusyliv and Nemyriv fault zones. In addition, some anomalies are found in the granite migmatites of the Ros' structural-formation zone, outside the tectono-metasomatic minerogenic zones. As a rule, anomalies are confined to zones of disintegration of crystalline basement rocks, elongated zones of metasomatization, and areas of distribution of graphitized rocks; moreover, some of the surface anomalies correspond to regions of weathering crusts. The conducted geological-geoelectrical analysis of the model showed that several areas require further study, namely the sub-latitude anomaly west of the Zoziv-Stryzhavka profile and the complex-shaped anomaly in the eastern part of the study area. As promising for the search for minerals, which meets the geoelectrical criteria, the area of the anomaly within the Brusyliv fault zone with a depth of up to 2 km is highlighted.

Keywords: geoelectromagnetic methods, three-dimensional model interpretation, conductivity anomalies, ore occurrences of minerals.