

Тривимірна геоелектрична модель центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита

Т.К. Бурахович, В.А. Ільєнко, А.М. Кушнір, 2022

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

Надійшла 13 липня 2022 р.

З метою з'ясування глибинної будови складної в геоелектричному сенсі зони зчленування трьох мегаблоків західної частини Українського щита (Волинського, Подільського та Росинського) створено тривимірну модель центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів, в основу якої покладено сучасні експериментальні спостереження низькочастотного природного електромагнітного поля Землі в широкому діапазоні періодів. Проаналізовано синхронні експериментальні дані глибинного магнітотелуричного зондування та магнітоваріаційного профілювання, які отримано Інститутами НАН України у 2009—2019 рр. Розглянуто основні питання методики геоелектричного моделювання з використанням програмного комплексу Mtd3fwd, такі як елементи моделі, етапи, альтернативні моделі, приклади зіставлення розрахунків зі спостереженими даними, похибки та інше. Аналіз побудованої моделі показав, що із великої кількості приповерхневих аномалій з низьким питомим опором від 5 до 100 Ом · м більшість з них занурюються до глибини 500 м і тільки декілька перетинають глибину 1 км та простежуються до глибини 11 км. Установлено, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської і Немирівської зон розломів, Самгородського розлому та Кочерівського синклінорію. Більшість виділених провідників виявляються мозаїчно вздовж протяжних зон розломів та утворюють перемешовані ланцюжки високого та низького опору. Підтверджено та деталізовано регіональні аномалії як у глибинній частині земної кори, так і у верхній мантії, частина Звіздаль-Заліської зони розломів простежена на глибинах 15—30 км як зона контакту аномальних високого та низького опорів. Аномалії тяжіють до видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітізованих порід, частина поверхневих аномалій відповідає ділянкам кори вивітрювання. Більшість аномалій збігаються з рудопроявами, рудоносними полями і родовищами корисних копалин. Геолого-геоелектричний аналіз моделі дав змогу вперше виділити дві перспективні для подальшого вивчення ділянки, які відповідають геоелектричним критеріям пошуку корисних копалин: уздовж Звіздаль-Заліської зони розломів між Самгородським та Унавським розломами; уздовж Самгородського розлому в зоні його перетину з Кочерівським і Таборівським розломами.

Ключові слова: Український щит, Звіздаль-Заліська зона розломів, Брусилівська зона розломів, магнітотелуричне зондування, магнітоваріаційне профілювання, тривимірна геоелектрична модель, аномалії електропровідності, корисні копалини.

Вступ. Однією з найважливіших проблем фундаментальних досліджень в галузі наук про Землю є вивчення глибинної будови літосфери геофізичними методами з метою з'ясування закономірностей розміщення родовищ корисних копалин і виді-

лення перспективних площ для постановки пошукових і розвідувальних робіт. Особливу увагу приділяють ролі глибинних розломів у процесі формування і розподілу родовищ деяких корисних копалин. Межі літосферних плит, блоків земної кори та між-

блокові системи дуже часто контролюють промислові концентрації корисних копалин ендегенного походження, оскільки саме такі зони характеризуються процесами активізації земної кори та дегазації [Шестопалов и др., 2018; Очерки ..., 2018; Нечаев и др., 2019]. Вони мають особливі, найчастіше досить контрастні геофізичні властивості, зокрема й геоелектричні, і можуть бути виявлені за допомогою методів глибинної електророзвідки [Verdichevsky, Dmitriev, 2008].

У більшості випадків зони тектонічних порушень зазвичай характеризуються низькими значеннями електричного опору порівняно із вміщуючими породами, тобто електричні параметри гірських порід, що складають верхню частину розрізу, дають змогу виявляти рудопрояви завдяки метасоматичним змінам навколорудних порід — графітізації, сульфідизації, озалізненню і окварцюванню. Перспективи і приклади застосування магнітотелуричних (МТ) і магнітоваріаційних (МВ) методів при пошуках і розвідці рудних родовищ розглянуті в публікаціях авторів зі всього світу [Spratt et al., 2009; Vaittinen et al., 2012; Khoza et al., 2013; Smith, 2014; Cherevatovaa et al., 2015; Zaher et al., 2017; Curtis, Thiel, 2019].

При вивченні глибинної будови Українського щита (УЩ) МТ/МВ методами та подальшому 3D моделюванні [Бурахович и др., 2015] було виявлено низькоомні аномалії з різними геоелектричними параметрами в земній корі та верхній мантії, зокрема приповерхневі субвертикальні, які простягаються уздовж зон розломів (ЗР). Над глибинними коровими аномаліями електропровідності УЩ [Белявський и др., 2001; Бурахович и др., 2015; Ширков, Бурахович, 2017] виявлено численні рудопрояви і родовища.

Метою цієї статті є вивчення глибинної будови складної в геоелектричному сенсі зони зчленування трьох мегаблоків західної частини УЩ (Волинського, Подільського та Росинського) за результатами тривимірного моделювання низькочастотного природного електромагнітного поля Землі, в основу якого покладено сучасні експериментальні спостереження. Особливу увагу

придлено електропровідності ЗР, таких як Звіздаль-Заліська, Брусилівська, Немирівська, Андрушівська, Центральна, а також Самгородського, Варварівського та інших розломів. При геолого-геофізичній інтерпретації геоелектричної моделі проаналізовано питання зв'язку аномалій електропровідності з рудопроявами корисних копалин.

Експериментальні геоелектромагнітні спостереження. Огляд уявлень про тектонічну структуру ділянки досліджень, глибинну геоелектричну будову за попередніми [Белявський и др., 2001; Геолого-геофизическая ..., 2009] і сучасними синхронними МТ/МВ спостереженнями вздовж серії субширотних профілів: Радомишль—Фастів, Корнинський, Ружин—Сквира, Белилівка—Антонів, Ширмівка—Логвин, Ординці—Лобачів і Зозів—Стрижавка (рис. 1), наведено у публікаціях [Николаев та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019, 2020; Puyenko et al., 2019; Ільєнко, 2020].

Основний результат якісної інтерпретації геоелектричних досліджень — виявлення аномалій високої електропровідності як у земній корі, так і у верхній мантії, які визначаються різною провідністю і глибиною залягання, конфігурацією і по-різному характеризують різні геологічні структури. Передбачається наявність аномалій високої електропровідності вздовж розломів (Віленського, Кочерівського, Погребищенського, Огієвського, Варварівського) та ЗР (Андрушівської, Звіздаль-Заліської, Брусилівської), які частково приурочені до зон метасоматозу. Все це свідчить про складний неоднорідний розподіл телуричних струмів у надрах регіону досліджень та потребує подальшої інтерпретації із застосуванням тривимірного моделювання електромагнітних полів Землі.

Методика тривимірного геоелектричного моделювання. Найпоширенішим алгоритмом тривимірного моделювання електромагнітних полів Землі вважається програма Mtd3fwd, в яку закладено інтегральну форму рівнянь Максвелла для визначення скінченно-різницевої апроксимації електромагнітних полів [Maskie, Booker, 1999].

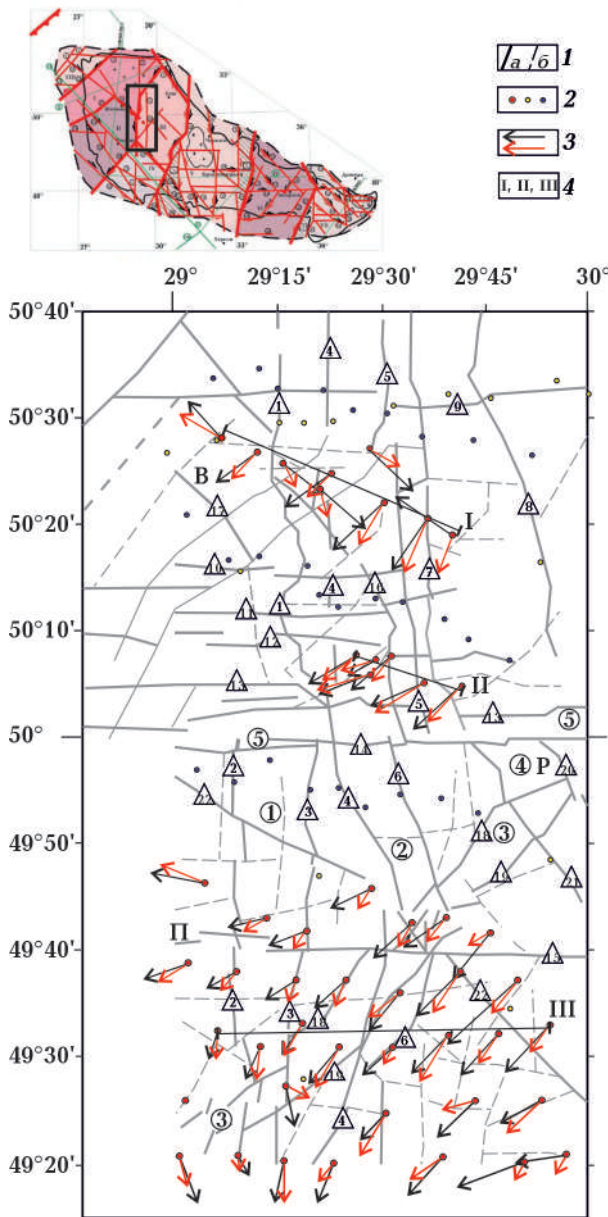


Рис. 1. Район центральної частини (49°15'—50°40' пн. ш. × 28°45'—30° зх. д.) планшета 3D геоелектричної моделі Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР УЩ на схемі мегаблоків і зон розломів УЩ (вставка) за даними [Очерки ..., 2018] і на геолого-тектонічній карті поверхні кристалічного фундаменту за даними [Державна ..., 2003, 2005]: 1 — глибинні та головні розломи (а), інші тектонічні порушення (б); 2 — пункти спостереження МТЗ та МВП: червоний колір — за даними [Николаев та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019, 2020; Ільєнко et al., 2019; Ільєнко, 2020], жовтий — [Ingerov et al., 1999], синій — [Геолого-геофизическая ..., 2009]; 3 — типпери на періоді 100 с (чорні — спостережені, червоні — розраховані модельні); 4 — профілі (I — Радомишль—Фастів [Николаев та ін., 2019], II — Корнинський [Ільєнко та ін., 2020], III — Ширмівка—Логвин [Ільєнко та ін., 2019]). Мегаблоки

Основними елементами методики тривимірного моделювання можна вважати:

– задані значення питомого електричного опору (ρ) «нормального» горизонтально-шаруватого розрізу земної кори і верхньої мантії, на фоні яких будуються об'ємні геоелектричні моделі. Закладено загальноприйнятий одновимірний «нормальний» розріз земної кори та верхньої мантії з параметрами: $\rho_1 = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_1 = 500 \text{ м}$; $\rho_2 = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_2 = 159 \text{ 500 м}$; $\rho_3 = 600 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_3 = 40 \text{ 000 м}$; $\rho_4 = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_4 = 50 \text{ 000 м}$; $\rho_5 = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_4 = 70 \text{ 000 м}$; $\rho_6 = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_6 = 80 \text{ 000 м}$; $\rho_7 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_7 = 100 \text{ 000 м}$; $\rho_8 = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $h_8 =$

УЩ: П — Подільський, Р — Росинський, В — Волинський. Зони розломів (цифри в кружках): 1 — Звіздаль-Заліська, 2 — Брусилівська, 3 — Немирівська, 4 — Центральна, 5 — Андрушівська. Розломи (цифри в трикутниках): 1 — Віленський, 2 — Огіївський, 3 — Погребищенський, 4 — Кочерівський, 5 — Брусилівський, 6 — Великоерчиківський, 7 — Вільшанський, 8 — Макарівський, 9 — Глухівський, 10 — Коростишівський, 11 — Житомирський, 12 — Машеринський, 13 — Андрушівський, 14 — Унавський, 15 — Самгородський, 16 — Центральний, 17 — Старосільський, 18 — Таборівський, 19 — Павлівський, 20 — Улашівський, 21 — Трушківський, 22 — Варварівський.

Fig. 1. The region of the central part (49°15'—50°40' N × 28°45'—30° W) of the 3D geoelectric model area of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv FZ of the USH on the scheme of megablocks and fault zones of the USH (inset) according to data [Gintov et al., 2018] and the geological-tectonic map of the surface of the crystalline basement according to [State ..., 2003, 2005]: 1 — deep and main faults (a), other tectonic disturbances (b); 2 — observation points of MTZ and MVP: in red according to data [Nikolaev et al., 2019, Ільєнко et al., 2019, 2020, Ільєнко, 2020], in yellow [Ingerov et al., 1999] and blue [Antsiferov et al., 2009]; 3 — tippers for a period of 100 s (observed in black, model calculated in red); 4 — profiles (I — Radomyshl—Fastiv [Nikolaev et al., 2019], II — Korninsky [Ільєнко et al., 2020] and III — Shirmivka—Logvin [Ільєнко et al., 2019]). USH megablocks: П — Podil, Р — Rosyn, В — Volyn. Fault zones (numbers in circles): 1 — Zvizdal-Zaliska, 2 — Brusyliv, 3 — Nemyriv, 4 — Tsentralna, 5 — Andrushiv. Faults (numbers in triangles): 1 — Vilensky, 2 — Ogiivsky, 3 — Pogrebyshchensky, 4 — Kocherivsky, 5 — Brusylivsky, 6 — Velikoyerchikivsky, 7 — Vilshansky, 8 — Makarivsky, 9 — Glukhivsky, 10 — Korostyshsky, 11 — Zhytomyr, 12 — Masherynsk, 13 — Andrushivsk, 14 — Unavsk, 15 — Samhorodsk, 16 — Central, 17 — Starosilsk, 18 — Taborivsk, 19 — Pavlivsk, 20 — Ulashivsk, 21 — Trushkivsk, 22 — Varvarivsk.

$= 100\ 000\ \text{м}$; $\rho_9 = 5\ \text{Ом} \cdot \text{м}$, $h_9 = 160\ 000\ \text{м}$; $\rho_{10} = 1\ \text{Ом} \cdot \text{м}$, $h_{10} = 200\ 000\ \text{м}$;

– *неоднорідний розподіл електропровідності приповерхневого провідного шару*. Ділянка моделювання знаходиться в межах кристалічного щита і характеризується мінімальним осадовим покривом [Белявський і др., 2001]. Центральна частина планшета (Росинський, Волинський та Подільський мегаблоки в контурах $49^\circ 15' - 50^\circ 40'$ пн. ш. \times $28^\circ 45' - 30^\circ$ зх. д., див. рис. 1) характеризується майже відсутністю осадових відкладів з ділянками, де кристалічні породи виходять на земну поверхню, значення сумарної поздовжньої провідності (S) коливаються від 0,5 до 5 См. За межі центральної час-

тини планшета потрапляють на північному сході товщі осадових порід Дніпровсько-Донецької западини, на півдні — Причорноморської ($S = 100\ \text{См}$);

– *неоднорідний глибинний регіональний розподіл питомого опору*. Закладено з апріорної інформації регіональні аномалії електропровідності, за даними [Бурахович та ін., 2015]. Чернівецько-Коростенська ($\rho = 20\ \text{Ом} \cdot \text{м}$), що фрагментарно розташована на півночі центральної частини планшета та продовжується на захід, залягає в земній корі на глибині від 15 до 30 км. На півночі Волинського мегаблока (за межами центральної частини планшета) на відстані 40 км від північної границі Чернівецько-Коростенської

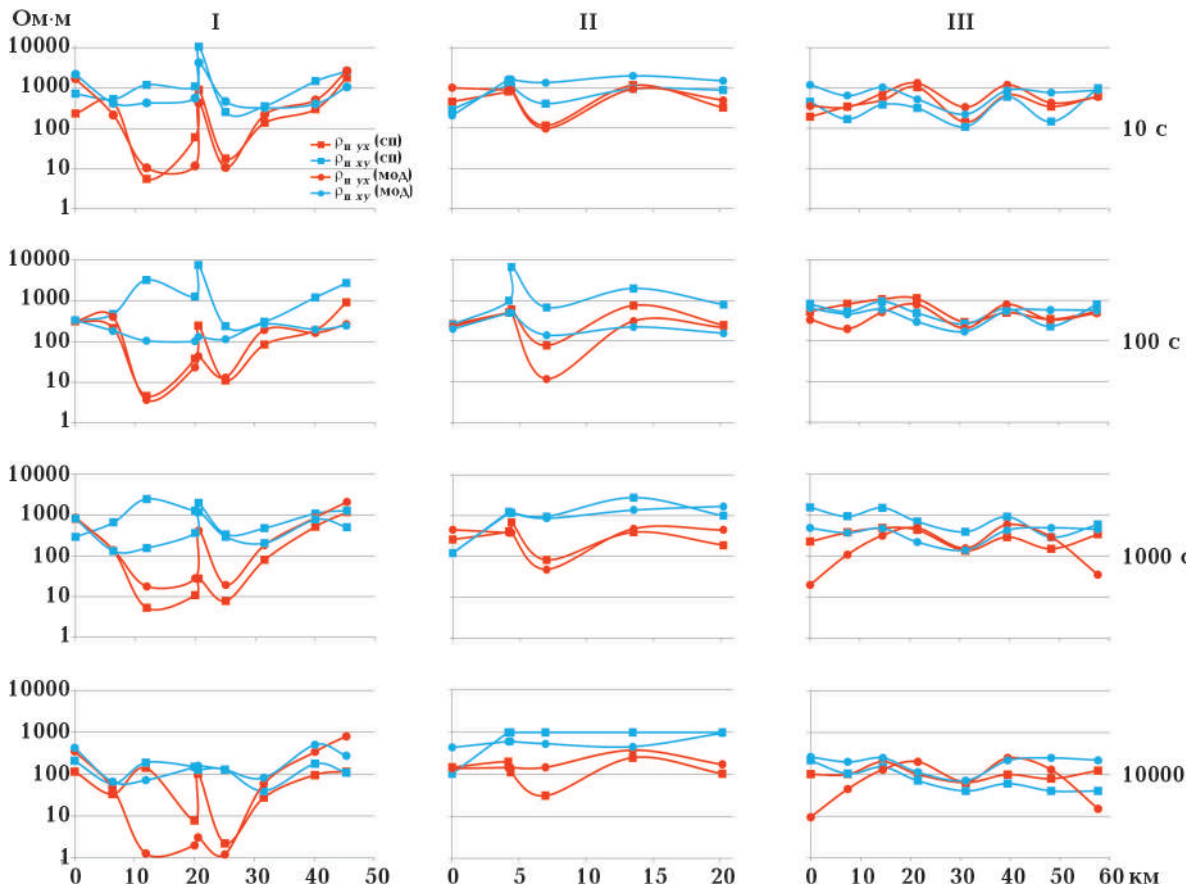


Рис. 2. Порівняння результатів розрахунків 3D моделі з експериментальними даними за профілями I, II, III. Графіки ρ_{II} (поляризація: субмеридіональна ρ_{xy} та субширотна ρ_{yx} ; за даними: сп — спостереженнями, мод — модельними) для періодів 10, 100, 1000, 10 000 с. Умовні позначення див. на рис. 1.

Fig. 2. Comparison of the results of calculations of the 3D model with experimental data according to profile I, II, III. Graphs of the ρ_{II} (polarization: submeridional ρ_{xy} and sublatitudinal ρ_{yx} ; according to data: (сп) — observed, (мод) — modeled) for periods of 10, 100, 1000, 10 000 s. Conventional designations see Fig. 1.

($\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) на тих же глибинах розташована Коростенська аномалія. У південній частині планшета було закладено астеносферу (з верхньою кромкою на глибині 50—70 км), яка з півдня на північ занурюється під західною частиною УЩ. Вона диференційована за ρ (від 48° пн. ш. простягається приблизно на 150 км у північному напрямку з $\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ і більше ніж на 300 км у південному з $\rho = 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Її східна межа трасується частково вздовж Тальнівської ЗР, північна поступово зміщується вздовж Хмельницької, де далі йде субширотно та відповідає уступу поверхні Мохо, південна проходить Кишинівською ЗР на широті південної межі УЩ [Ширков и др., 2017].

Було розраховано велику кількість моделей з різними варіантами як просторових параметрів аномальних структур, так і значень ρ в земній корі і верхній мантії [Ільєнко, 2020]. Спеціально розглядалися альтернативні моделі, наприклад: суцільної електропровідної глибинної структури Звіздаль-Заліської ЗР на всю потужність земної кори; картованої за даними [Державна ..., 2003, 2005] складної системи розломів із проявами метасоматозу гірських порід у вигляді вертикальних провідників з поверхні до 2 км з $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; електропровідних зон, отриманих за якісною інтерпретацією кривих МТЗ та типперів [Ніколаєв та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019, 2020]. Перевірялись варіанти моделей з різними параметрами регіональних аномалій електропровідності в земній корі та на астеносферних глибинах, включаючи їх повну відсутність. Для кожної моделі аналізувалась відповідність експериментальних і розрахованих значень індукційних параметрів і значень позірною опорю (ρ_{Π}) для різних періодів 10, 100, 1000 та 10 000 с геомагнітних варіацій вздовж серії профілів.

Підбір розподілу ρ було призупинено, коли розраховані модельні електромагнітні параметри задовольняли експериментальним даним: по-перше, похибка типперів становила близько 10—20 % за модулем та до 20° за напрямком, мінімальні значення похибок спостерігались при порівнянні на періоді 100 с, який наближений до макси-

муму частотної характеристики — періоди 200—400 с (див. рис. 1); по-друге, переважно зберігалось співвідношення кривих ρ_{Π} за поляризаціями; по-третє, для більшості експериментальних пунктів підбирались максимально наближена форма та рівень за ρ_{Π} вздовж профілів для різних періодів, похибка спостережених і модельних даних становить від кількох до 30 %; у майже 10 % пунктів кривих МТЗ (в одній із поляризацій) похибка суттєва, до одного порядку за абсолютними значеннями. Іноді у близько розташованих пунктах (менше 5—10 км) експериментальні спостереження різко відрізняються за рівнем ρ_{Π} (більш як на один порядок), підібрати модель та розраховані значення у такому разі складно (наприклад, профіль Радомишль—Фастів). Імовірно, що узгодити рівень ρ_{Π} можливо за детальнішою сіткою моделювання.

Приклади графіків ρ_{Π} за спостереженнями та модельними даними для різних періодів уздовж окремих профілів Радомишль—Фастів [Ніколаєв та ін., 2019], Корнинського [Ільєнко та ін., 2020] і Ширмівка—Логвин [Ільєнко та ін., 2019] наведено на рис. 2.

Аналіз тривимірної геоелектричної моделі. Візуалізацію кінцевої моделі надр локальної ділянки заходу УЩ центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР (рис. 3, 4) наведено у 3D вигляді горизонтальними зрізами для різних глибин (поверхерка), нанесених на геолого-тектонічну карту поверхні кристалічного фундаменту, та вертикальними розрізами 3D геоелектричної моделі (рис. 5) вздовж різноорієнтованих профілів, які перетинають різні геолого-тектонічні структури.

Загалом виявлено дві серії аномалій електропровідності (приповерхневу та глибинну локальну) з низьким ρ від 5 до 100 Ом · м на різних глибинах верхньої 11-кілометрової товщі земної кори, які, імовірно, пов'язані із зонами дезінтеграції порід кристалічного фундаменту, метасоматично перетворених порід, графітизації та можливої дегазації надр.

Перша (приповерхнева) характеризується гальванічно пов'язаною мережею провідників на глибинах від поверхні до 1 км,

які переважно відповідають тектонічним структурам району моделювання. Друга (глибинна локальна) представлена окремими високопровідними ($\rho = 5 \div 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) ділянками в інтервалі глибин від 1 до 11 км. Деякі аномалії існують одразу в двох серіях.

Серія приповерхневих аномалій. Північна частина планшета (Волинський та Росинський мегаблоки) відрізняється наявністю локальних відокремлених аномалій різної орієнтації в просторі з $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Розмір найбільшої (головної) $50 \times 10 \text{ км}$, найменшої $5 \times 5 \text{ км}$. Починаючи з глибини 300 м більшість аномальних ділянок зникає і тільки головна залишається та простежується до 2 км, при цьому зменшується її просторовий розмір до $30 \times 10 \text{ км}$ і збільшується електропровідність до $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Звернемо увагу, що Кочерівський синклінорій не проявився як суцільна електропровідна структура, при цьому більшість виявлених аномалій припадає саме на нього. Окремі електропровідні ділянки тяжіють та вишиковуються вздовж частин розломів та їх перетинів, таких як Віленський, Кочерівський, Центральний, Машеринський та Вільшанський в межах синклінорію. Головна аномалія є субширотною (на відміну від субмеридіональної орієнтації синклінорію) і припадає на його найширшу частину в зонах перетинів розломів — Віленського та Кочерівського з Центральним, Вільшанського з Брусилівським, а також зазначених вище розломів із серією субширотних розломів меншого порядку.

Південна частина планшета (Подільський та Росинський мегаблоки) характеризується мережею гальванічно пов'язаних видовжених провідників різної орієнтації в просторі. Це здебільшого вузькі 5-кілометрові зони, які простягаються від 20 до 90 км, з ρ від 5 до $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Майже вся мережа простежується до глибини 500 м і зникає глибше 1 км. Винятком є локальна зона з розмірами $10 \times 10 \text{ км}$ і глибиною 2 км (в її межах розташований пункт KRG профілю Ширівка—Логвин [Ільєнко та ін., 2019]), що з поверхні гальванічно зв'язана з мережею провідників і відрізняється найменшим ρ ($5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

Переважає більшість провідників просторово збігається з ЗР, окремими розломами та їх перетинами. Особливу увагу привертає область зосередження аномалій в «трикутнику» перетину Звездаль-Заліської (на заході), Брусилівської та Немирівської (на південному сході) ЗР та Самгородського розлому (на півночі).

Звездаль-Заліська ЗР не проявилася як суцільний провідник у тектонічних границях, її більша частина характеризується розгалуженою системою субмеридіональних провідників до глибини 500 м. Їх ширина змінюється від 5 до 15 км, загальна видовженість становить 80 км, з $\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (у зонах перетину з субширотними аномаліями збільшується до $10\text{—}50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Між Унавським і Самгородським розломами вона представлена двома паралельними провідниками та максимально занурюється на глибину 1 км (див. рис. 3, 5).

Брусилівська та Немирівська ЗР також не виділяються як цілісні аномально провідні об'єкти (див. рис. 3, 5). Проте область їх перетину південніше Самгородського розлому відповідає складнопобудованій аномалії з набором ділянок, різних за ρ від 5 до $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, на глибинах переважно до 500 м з найбільш провідним фрагментом до 2 км, який описано вище. Водночас північніше є три окремі локальні зони з високою електропровідністю ($\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ від поверхні до глибини 300—500 м): перша в місці перетину з Машеринським розломом (уздовж якого простягається аномалія), друга — з Житомирським, Коростишівським і Вільшанським, третя — східна частина головної приповерхневої ділянки.

В області перетину Немирівської ЗР із Звездаль-Заліською також виявлено складну за формою (система паралельних і перетинаючих об'єктів розмірами $5\text{—}10 \times 15\text{—}55 \text{ км}$) аномалію з ρ від 5 до $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, орієнтація окремих гілок якої відповідає простяганню ЗР. Передбачається, що південніше планшета моделювання (вздовж простягання Звездаль-Заліської ЗР) аномалія звужується зі зменшенням інтенсивності за ρ , тоді як аномалія на південному заході — заході (орієнтовно вздовж простягання Немирів-

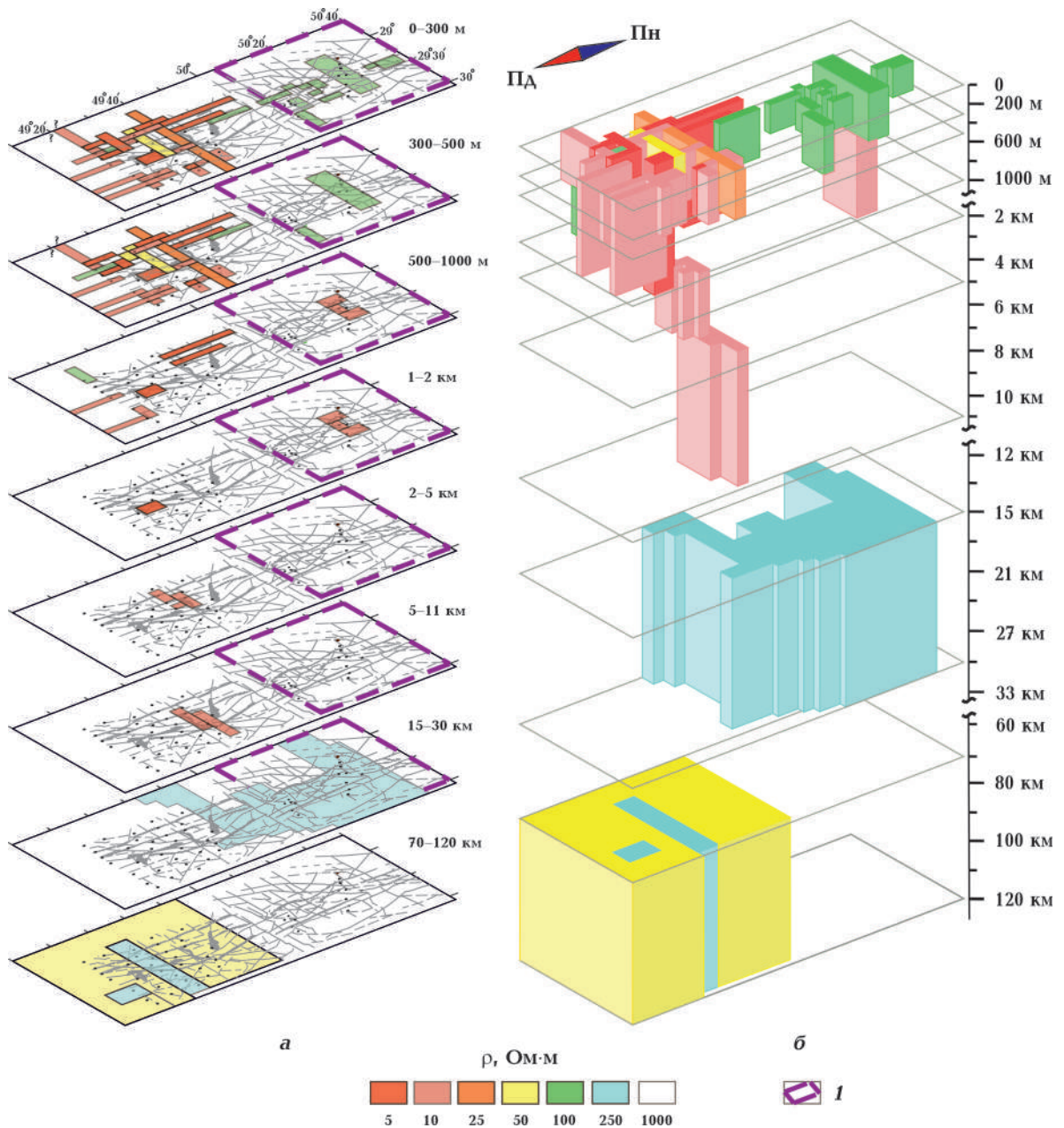


Рис. 3. Розподіл питомого електричного опору за результатами 3D моделювання центральної частини Звиздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита: *a* — пошаровий на геолого-тектонічній карті поверхні кристалічного фундаменту за даними [Державна ..., 2003, 2005] для глибин 0—300 м, 300—500 м, 500—1000 м, 1—2 км, 2—5 км, 5—11 км, 15—30 км, 70—120 км; *б* — об'ємний розподіл аномалій електропровідності в земній корі та верхній мантії; 1 — контур аномально високого опору $\rho = 10\,000$ Ом · м вміщуючих порід. Умовні позначення див. на рис. 1, 4.

Fig. 3. Distribution of specific electrical resistance according to the results of 3D modeling of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield: *a* — layer-by-layer on the geological-tectonic map of the surface of the crystalline basement according to [State..., 2003, 2005] for depths 0—300 m, 300—500 m, 500—1000 m, 1—2 km, 2—5 km, 5—11 km, 15—30 km, 70—120 km; *b* — volumetric distribution of electrical conductivity anomalies in the Earth's crust and upper mantle; 1 — out line anomalous of high resistance $\rho = 10\,000$ Ом · m containing rocks. Conventional designations see Fig. 1, 4.

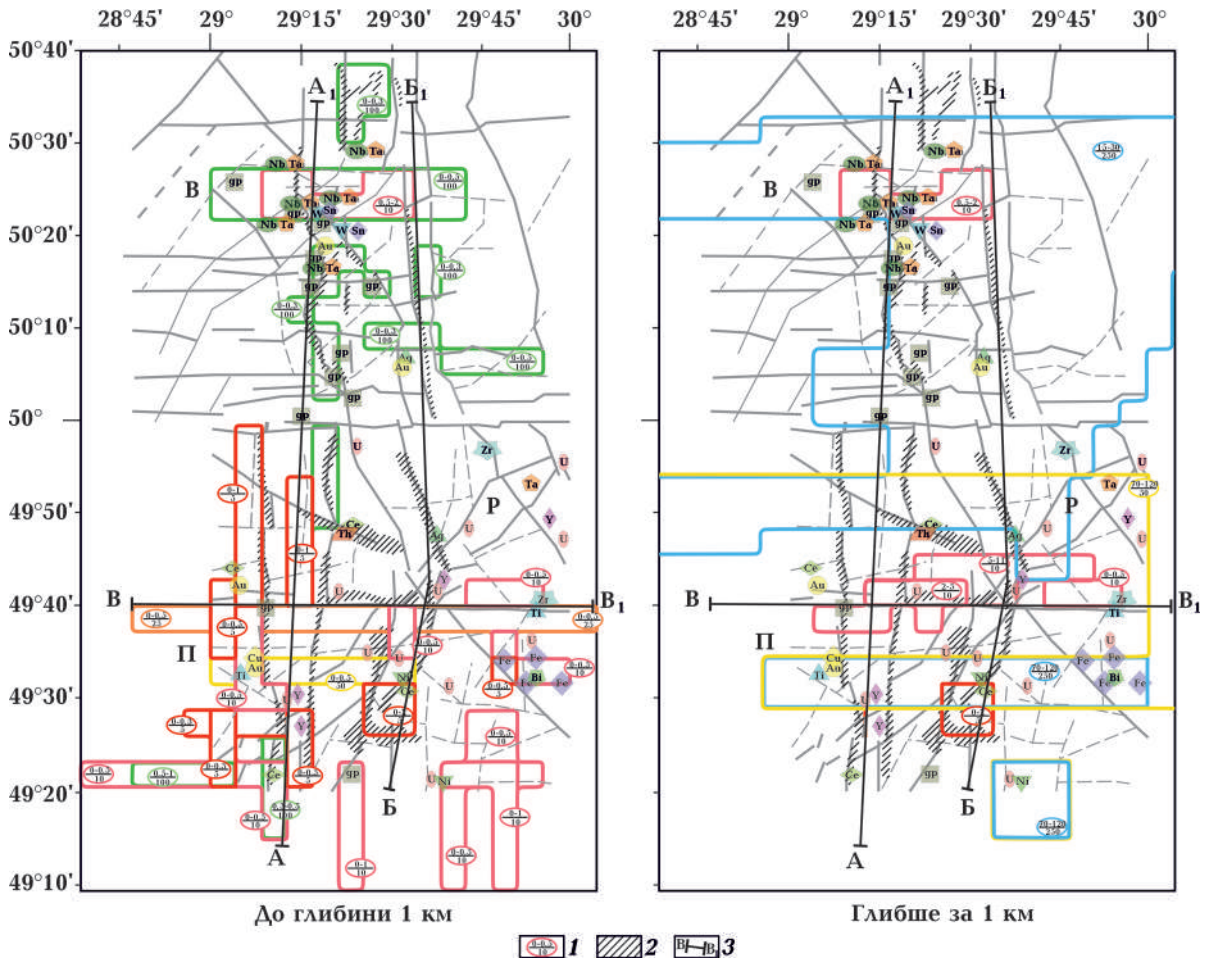


Рис. 4. Аномалії електропровідності за результатами тривимірного моделювання електромагнітного поля на геолого-тектонічній карті поверхні кристалічного фундаменту за даними [Державна ..., 2003, 2005]: 1 — параметри аномалії електропровідності (числівник — інтервал глибин, км; знаменник — ρ за моделлю, Ом · м); 2 — зони метасоматозу; 3 — інтерпретаційні профілі. Корисні копалини: залізо (Fe), титан (Ti), вольфрам (W), мідь (Cu), нікель (Ni), олово (Sn), цирконій (Zr), вісмут (Bi), ніобій (Nb), тантал (Ta), золото (Au), срібло (Ag), церій (Ce), ітрій (Y), уран (U), торій (Th), графіт (gp). Умовні позначення див. на рис. 1, 3.

Fig. 4. Anomalies of electrical conductivity according to the results of three-dimensional modeling of the electromagnetic field on the geological-tectonic map of the surface of the crystalline foundation according to [State ..., 2003, 2005]: 1 — parameters of electrical conductivity anomaly: numerator — depth interval, km, denominator — ρ according to the model, Ohm · m; 2 — zones of metasomatism; 3 — interpretive profiles. Minerals are shown by letters: iron (Fe), titanium (Ti), tungsten (W), copper (Cu), nickel (Ni), tin (Sn), zirconium (Zr), bismuth (Bi), niobium (Nb), tantalum (Ta), gold (Au), silver (Ag), cerium (Ce), yttrium (Y), uranium (U), thorium (Th), graphite (gp). Conventional designations see Fig. 1, 3.

ської ЗР) потребує додаткових експериментальних спостережень. Ця ділянка привертає увагу тим, що занурюється до 1 км з $\rho = 100$ Ом · м на відміну від решти, які на глибинах більших за 500 м зникають.

Самгородський розлом проявився в аномальній електропровідності субширотною полоскою завширшки 5 км та завдовжки біль-

ше 90 км (див. рис. 3, 5). Його верхній електропровідний шар, ускладнений при перетинах ЗР, прослідковується до 500 м.

У південно-східній частині планшета виділено декілька провідників субмеридіонального простягання з $\rho=10$ Ом·м, які зменшуються з глибиною. Вони просторово не збігаються з великими тектонічними порушеннями.

Серія глибинних локальних аномалій. З великої кількості приповерхневих аномалій більшість занурюється глибше 500 м і тільки декілька перетинають глибину 1 км. У північній частині планшета така ділянка пов'язана з потужним субширотним провідником у межах Кочерівського синкліорію між Віленським і Вільшанським розломами.

У південній частині планшета — дві локальні ділянки: одна є продовженням на глибину до 2 км згаданої вище приповерхневої аномалії, що перетинається профілем Ширмівка—Логвин; друга локально ізольована від приповерхневих аномалій ділянкою з $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (потужністю 1,5 км), над нею розташований витягнутий провідник Самгородського розлому (див. рис. 3, 5). Вона має складну форму субширотного простягання на глибинах від 2 до 11 км з $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, при цьому її загальні розміри збільшуються з глибиною та становлять $5\text{—}10 \times 30\text{—}45 \text{ км}$.

Глибше передбачається невеликий за потужністю (4 км) шар високого опору з $\rho = 1000$ та $10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, можливо, представлений однорідною недиференційованою товщею. Просторово зона контакту проходить уздовж Андрушівської ЗР. Слід зазначити, що для УЩ «нормальним» ρ на глибинах до 160 км вважається $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Більш високі аномальні значення $\rho = 10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ та вище в земній корі неодноразово спостерігалися в тектонічних структурах УЩ різного рівня, наприклад, Середньопридніпровський мегаблок [Белявський и др., 2001; Бурахович и др., 2015] і частини масивів гіпербазитів та гранітоїдів: Уманського, Новоукраїнського та Корсунь-Новомиргородського [Ширков и др., 2017]. У цьому дослідженні показано, що аномалії високого $\rho = 10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ поширюються на всю потужність земної кори до глибини 50 км майже з поверхні та просторово добре узгоджуються з масивами гранітів житомирського та фастівського комплексів Волинського й Росинського мегаблоків.

Загалом моделюванням підтверджено та деталізовано частину регіональної Чернівецько-Коростенської аномалії електропровідності в земній корі в інтервалі глибин

15—30 км з $\rho = 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (див. рис. 3, 4), а саме показано, що проєкція на земну поверхню її границь (у межах планшета моделювання) відповідає системі різноорієнтованих глибинних ЗР або їх частин: Тетерівської на північному заході (за межами планшета), Глухівської на півночі, Немирівської на південному сході, Самгородської та Варварівської на півдні. У горизонтальній площині аномалія не є суцільним високопровідним шаром, в ній є область з «нормальним» опором, яка просторово відповідає Коростишевському, Голубівсько-Щиглеївському та Городському масивам гранітоїдів. Внутрішня субмеридіональна границя контакту низького та нормального ρ проходить уздовж Віленського розлому, вона ускладнена в зоні перетину з субширотними Машеринським, Андрушівським та Унавським розломами.

Глибше, від 30 до 70 км, у зоні переходу земна кора—верхня частина верхньої мантії отримано ще один шар з «нормальним» і частково високим опором 1000 та $10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

За результатами моделювання уточнено розподіл ρ верхньої мантії південного заходу УЩ [Белявський и др., 2001; Бурахович и др., 2015]. У межах планшета підтверджено неоднорідний високопровідний шар з $\rho = 50 \div 250 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в інтервалі глибин від 70 до 120 км під Подільським та частково Росинським мегаблоками (див. рис. 3, 4). Проєкція його північної границі на поверхню майже відповідає району субширотного Унавського розлому, східна простягається субмеридіонально вздовж 30° зх. д. і розширюється на південь.

Зауважимо, що параметри регіональної аномалії в земній корі та верхній мантії підтверджуються інтерпретацією сейсмічного розрізу вздовж VI геотраверсу за даними Р-швидкісної моделі земної кори, яка показала, що Бузький мегаблок (на південь від планшета моделювання) має структуру куполоподібного підняття на границі Мохо, у верхній мантії та у самому піднятті середньої кори [Ильченко и др., 1988; Мичак та ін., 2022].

Геолого-мінералогічна інтерпретація геоелектричної моделі. В основу системи

критеріїв регіонального прогнозу покладено ідею, що умови і області 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 і верхньої мантії [Старостенко и др., 2011; Нечаев и др., 2019]. Як зазначено у статті [Мичак та ін., 2022] (з посиланням на [Зюльцде, 2003]), найголовнішими регіональними структурами, що вплинули на металогенічну спеціалізацію району досліджень, є Звиздаль-Заліська, Брусилівська, Немирівська, Центральна, Сарненсько-Варварівська та інші ЗР. Наявність аномалій високої електропровідності вздовж протяжних ЗР, до розвитку та активізації яких приурочені зони метасоматичної і гідротермальної діяльності, та їх відповідність металогенічним рудним і нерудним полям є геоелектричними критеріями для пошуків рудопроявів корисних копалин. Глибинні ЗР, які зумовлюють блоковий поділ земної кори, зазвичай є транспортними каналами надходження флюїдів з мантії у верхні горизонти.

За даними [Комплексна ..., 2003], точки Ti-Zr-рудопроявів і Ta-Nb-зруденіння тяжіють переважно до глибинних розломів: Віленського, Центрального, Погребищенського, Брусилівського, Великоерчиківського. Прояви золоторудної мінералізації приурочені до зони Центрального розлому, радіоактивних металів — до області перетину Немирівської та Центральної ЗР. Усі глибинні розломи характеризуються проявами прирозломного метасоматозу, який виражається проявами кварц-сульфідних жил у вміщуючих породах, утворенням польовошпатових метасоматитів, проявом зон грейзенізації. Ціла низка рудопроявів і точок мінералізації Ta і Nb, Be, Sn і W пов'язана з польовошпатовими метасоматитами, зонами скарнування і грейзенізації, приуроченими до субмеридіональних Кочерівської, Брусилівської і Центральної ЗР та Віленського розлому. Значна частина рудопроявів Be, Sn і W пов'язана зі скарнами і кварц-польовошпатовими метасоматитами, молібдену — з кварцюванням у комплексі з аномаліями золота,

міді, цинку, срібла. Більшість метасоматично перетворених порід розломів та ЗР проявилися у високій електропровідності до глибини 500—1000 м з різним ρ (див. рис. 4).

За схемою металогенічного районування території України [Атлас ..., 2001], регіон досліджень належить до мінералогенічної провінції УЩ; Волинської та Подільської субпровінцій.

У межах Волинської мінералогенічної субпровінції розташований Кочерівський синклінорій [Державна ..., 2003] з відповідними аномаліями електропровідності. Кочерівська ділянка вважається перспективною для розвідки нових рудопроявів і родовищ цілого ряду корисних копалин. Виключно всі закартовані рудні поля просторово знаходяться в межах глибинної регіональної аномалії (15—30 км) у земній корі. З приповерхневими та локально глибинними аномаліями (від поверхні до 2 км) збігається декілька рудних полів, а саме: Негребівське (Cu), Поташнянське (W) і Городське (Ta, Nb, Li, Rb, Cs, Be). Переважна більшість рудних полів потрапляє в зони приповерхневих аномалій (Чудинське, Корнінське, Віленське, Водотіївське та Красилівське (Au, Ag), Білківське (W, Au, Ag), Товстовське та Кочерівське (Ta, Nb, Li, Rb, Cs, Be, Au), Приворотинське (Cu та Ni), Карабачинське (W)). Що стосується рудоносних полів, які знаходяться за межами приповерхневої аномалії високої електропровідності: Кайтанівське (Ti) — ймовірно, потрібні додаткові експериментальні дослідження, Папірнянське (Ta, Nb, Li, Rb, Cs, Be) — можливо, необхідна більш детальна сітка моделювання.

Висока електропровідність уздовж Віленського розлому (як складової частини Звиздаль-Заліської ЗР), пов'язана із серією провідників з $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глибинах до 0,3—0,5 км (загальні просторові розміри 5—10 × 30—60 км), може бути спричинена графітизацією гірських порід (див. рис. 4, 5). Як зазначається в монографії [Геолого-геофизическая ..., 2009, с. 134] (з посиланням на [Державна ..., 2003]), «открыто девять проявлений графитовых и силлиманит-биотит-графитовых гнейсов городской свиты тетеревской серии, которая прослеживается

вдоль Виленского разлома на 60 км: Серединское, Руднягородецкое, Красиловское, Карабачинское, Виленское, Ходорковское, Любимовское, Браженецкое и Липское. Проявления относятся к гнейсо-графитовой формации метаморфогенного генетического типа ... мощность рудных пластов от 5,7 до 14 м». За магнітометричними даними Звездаль-Заліська ЗР майже повністю знаходиться в зоні регіонального мінімуму магнітного поля [Мичак та ін., 2022], який об'єднує ділянки земної кори з мінімальними значеннями намагніченості.

Подільську мінерагенічну субпровінцію в межах планшета моделювання з огляду на її рудопрояви можна поділити на дві частини: північну та південну, які розділяє Андрушівська ЗР.

У північній частині всі закартовані рудні поля [Державна ..., 2003] просторово відповідають регіональній аномалії електропровідності, але серед них тільки одне Юрівське (Ni, Co) розташоване в приповерхневій (0—300 м). Великогуляцьке рудне поле (Mo, Pb) просторово знаходиться між приповерхневими аномаліями, і можна припустити, що, по-перше, розміри комірки моделювання 5×5 км є занадто великими для отримання детальної картини розподілу питомого опору, по-друге, мережа експериментальних спостережень є недостатньо щільною. У цьому районі відстань між найближчими пунктами двох майже паралельних профілів більше 20 км. Цим же можна пояснити відсутність приповерхневої аномалії, яка пов'язана з Ярошівським рудоносним полем (Mo). Треба зазначити, що останнє рудне поле знаходиться в зоні Макарівського розлому, який, заданими [Бурахович и др., 2015], погано відображається в геоелектричних спостереженнях (зокрема і аудіо-МТЗ). Уздовж Макарівського профілю зберігається високий рівень електроопору ($3\text{—}5$ кОм · м).

На півдні від Андрушівської ЗР майже всі рудопрояви та мінерагенічні зони [Державна ..., 2005] збігаються з аномальною неоднорідністю у верхній частині верхньої мантії (70—120 км) і тільки деякі з них відповідають району південної частини регіональної аномалії електропровідності (на-

приклад, у межах Макарівського урановорудного поля розвідані родовища монацитів (рудопрояви Ce і Th) у долинах річок Роставиця та Рось до с. Трубіївка). Здебільшого приповерхневі аномалії (від поверхні до максимум 1 км) приурочені до кори витрювання над глибинними розломами і знаходяться в межах декількох мінерагенічних зон, таких як: Брусилівська ураноблагороднометалева тектоно-метасоматична мінерагенічна зона з Ружинським золоторудним і Макарівським урановорудним полями (див. рис. 4, 5); Немирівська уранорідкіснометалева тектоно-метасоматична мінерагенічна зона з Погребищенським рідкіснометалево-рідкісноземельним рудним полем. Також тут розташований Білоцерківський уранорідкісноземельний район (не пов'язаний з тектоно-метасоматичними зонами) з Березнянсько-Володарським урановорудним і залізорудним полем і Тетіївським урановорудним полем [Державна ..., 2005].

Субмеридіональні провідники на глибинах до 0,5—1 км уздовж Огіївського та Погребищенського розломів ($\rho = 5$ Ом · м) знаходяться в межах Ружинського золоторудного поля. Уздовж них розвідані як поклади графіту, так і рудопрояви міді, золота, титану. Рудопрояви міді виявлено в районі с. Ширмівка (див. рис. 4), свердловиною пробурені піроксенові кристалосланці потужністю 1,3 м, які залягають на гранітах бердичівського комплексу і представлені халькопіритами, піритами та піротинном. Між селами Огіївка та Зарудинці відомі прояви графітів у глиноземистих плагіогнейсах дністровсько-бузької серії, вони містяться в 12 шарах потужністю від 3 до 36 м (загальна потужність близько 450 м, протяжність 10 км) [Геолого-геофизическая ..., 2009].

Частково Білилівське рудне поле імпактних алмазів і золота можливо пов'язане з високою електропровідністю до 1 км (але таке твердження потребує додаткового дослідження та обговорення). Тут золото міститься в амфіболітизованому, кварцованому, карбонатизованому та сульфідизованому габро. Впевнено можна стверджувати, що існує зв'язок метасоматично перетворених порід уздовж Огіївського розло-

му (як частини Звездаль-Заліської ЗР) з вивіреною субмеридіональною приповерхневою аномалією електропровідності (див. рис. 4, 5). Також було виявлено рудні прояви: вісмуту, срібла, цинку.

Одна з найбільш високопровідних ділянок ($\rho = 5 \div 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глибинах від поверхні до 500 м) на південному сході області досліджень ($49^\circ 37' \text{ пн. ш. і } 29^\circ 46' \text{ сх. д.}$) збігається з відомими Володарським і Північноберезнянським родовищами заліза [Державна ..., 2005], які пов'язані з покладами залізистих кварцитів володарсько-білоцерківської товщі, та Північноберезнянським родовищем урану (див. рис. 4). Останнє приурочене до порід гідротермального та метасоматичного походження й локалізоване в зонах тріщинуватості.

Відоме Тарасівське родовище титану та цирконію (північніше цих родовищ) проявилось в межах аномалії електропровідності ($\rho = 10 \div 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глибинах від поверхні до 500 м), яка простягається вздовж Самгородського розлому (див. рис. 4, 5).

Права гілка приповерхневої аномалії складної конфігурації ($\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на глибинах від поверхні до 500—1000 м) перетинається з Тетіївським урановорудним полем [Державна ..., 2005]. Прояви нікелю виявлено в корах вивірювання серпентинітових і термолітизованих ультрабазитів поблизу сіл Чепижинці і Тележинці ($49^\circ 20' \text{ пн. ш. і } 29^\circ 37' \text{ сх. д.}$). Також рудопрояви нікелю виявлено біля с. Каленна ($49^\circ 30' \text{ пн. ш. і } 29^\circ 30' \text{ сх. д.}$), оконтурені три масиви з корами вивірювання серпентинітів, де аномальну електропровідність ($\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) виявлено до глибин 2 км (див. рис. 4).

У складній за конфігурацією та геоелектричними параметрами ($\rho = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ до глибини 0,5—2 км та $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) частково аномальній зоні знаходиться монацитове родовище (протяжністю до 40 км) у долині р. Рось (між селами Васильківці та Мармулівка (див. рис. 4)), яке пов'язане з корою вивірювання бердичівських гранітів і відкладами алювію [Геолого-геофизическая ..., 2009].

У межах Погребищенського рудного поля відомі прояви мінералу ксенотим (рудо-

прояви ітрію, $49^\circ 27' \text{ пн. ш. і } 29^\circ 15' \text{ сх. д.}$) [Геолого-геофизическая ..., 2009]. Вони належать до кори вивірювання гранітів уманського комплексу та гранітизованих амфіболітів росинсько-тікицької серії і приурочені до Погребищенського розлому. Також тут знаходяться прояви урану, пов'язані з пегматитами уманського комплексу та приурочені до перетину Немирівської ЗР і Погребищенського розлому.

Вздовж великого широтного провідника, який складається з двох частин: приповерхневої до 500 м з $\rho = 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ та глибинної локальної, що занурюється із заходу на схід у діапазоні глибин від 2 до 11 км (між $49^\circ 40' \text{ і } 49^\circ 45' \text{ пн. ш. та між } 29^\circ 02' \text{ і } 29^\circ 50' \text{ сх. д.}$) з $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, родовища корисних копалин не простежуються, але знаходяться рудопрояви урану та ітрію. Згідно з картою [Державна ..., 2005], верхня частина аномалії збігається із зоною прирозломного метасоматозу Самгородського, Великоерчиківського та Погребищенського розломів і входить до складу Макарівського ураново-рудного поля.

Проаналізуємо геоелектричні розрізи тривимірної моделі вздовж профілів, які перетинають різні геолого-тектонічні структури: А—А₁ — субмеридіональний по Звездаль-Заліській ЗР, Б—Б₁ — субмеридіональний по Брусилівській ЗР та В—В₁ — субширотний по Самгородському розлому (див. рис. 5).

А—А₁. У межах планшета Звездаль-Заліська ЗР простягається на відстань 140 км та з півдня проходить у Бузькому мегаблоці (пікети 0—20 км), далі на північ є міжмегаблоковою (пікети 20—77 км між Подільським і Росинським), а потім у Волинському від пікету 77 км і до кінця профілю. Вздовж Звездаль-Заліської ЗР у розрізі представлено всі серії аномальної електропровідності, але єдиної витягнутої гальванічно зв'язаної структури на будь-якій глибині не виявлено. Геоелектрично профіль можна розділити на три частини. Перша (пікети 0—40 км) представлена мозаїчною за ρ від 5 до 100 Ом · м приповерхневою аномалією та електропровідною астеносферою на фоні «нормального» $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Друга (пікети 40—75 км) вирізняється високою електропро-

відністю всього розрізу земної кори та верхньої мантії з ρ вміщуючих порід 1000 Ом·м, що може свідчити як про аномально високу проникність порід архейсько-протерозойського віку, так і про сліди проявів активізації. У третій виділено провідники тільки в земній корі на глибинах 15–30 та 0–2 км на фоні з аномально високим $\rho = 10\,000$ Ом·м від поверхні до 50 км. Як зазначено вище, більшість приповерхневих аномалій просторово приурочені до перетинів з Немирівською ЗР, Самгородським, Варварівським, Машеринським, Центральним розломами. Перші дві частини профілю просторово відповідають розташуванню рудопоявів і руд-

них полів переважно радіоактивних, третя пов'язана з рідкіснометальними та рідкісноземельними металами. Рудопояви благородних металів і графіту спостерігаються вздовж всього профілю.

На південному заході породи УЩ зазвичай представлені різними гнейсами, сланцями, кристалічними вапняками та різноманітними магматичними утвореннями, з якими пов'язані родовища графіту. За геологічними даними можна припустити існування на різних глибинах формацій, що вміщують графіт [Радзивилл, 1994; Рябенко и др., 1980; Яценко, 2008], з якими пов'язана аномальна електропровідність.

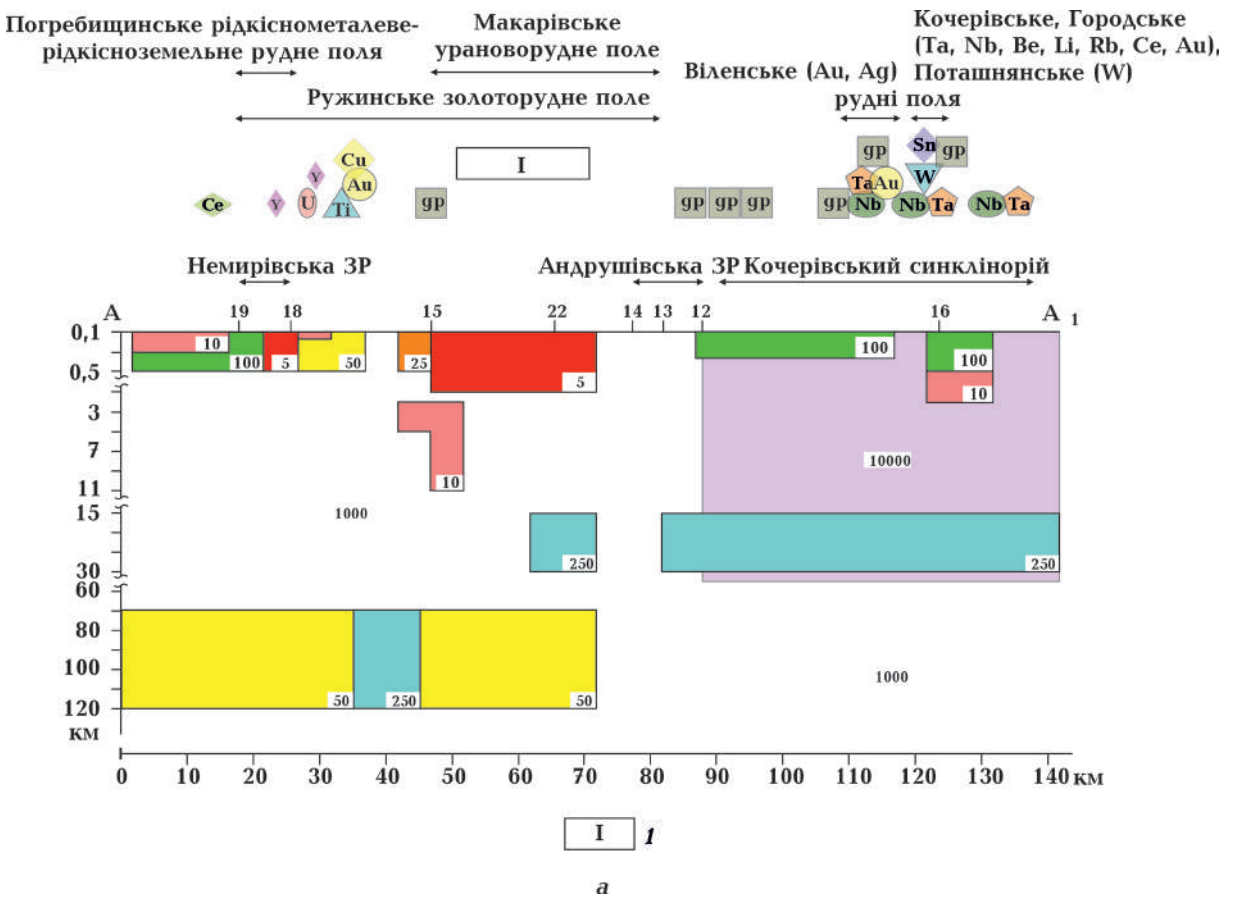
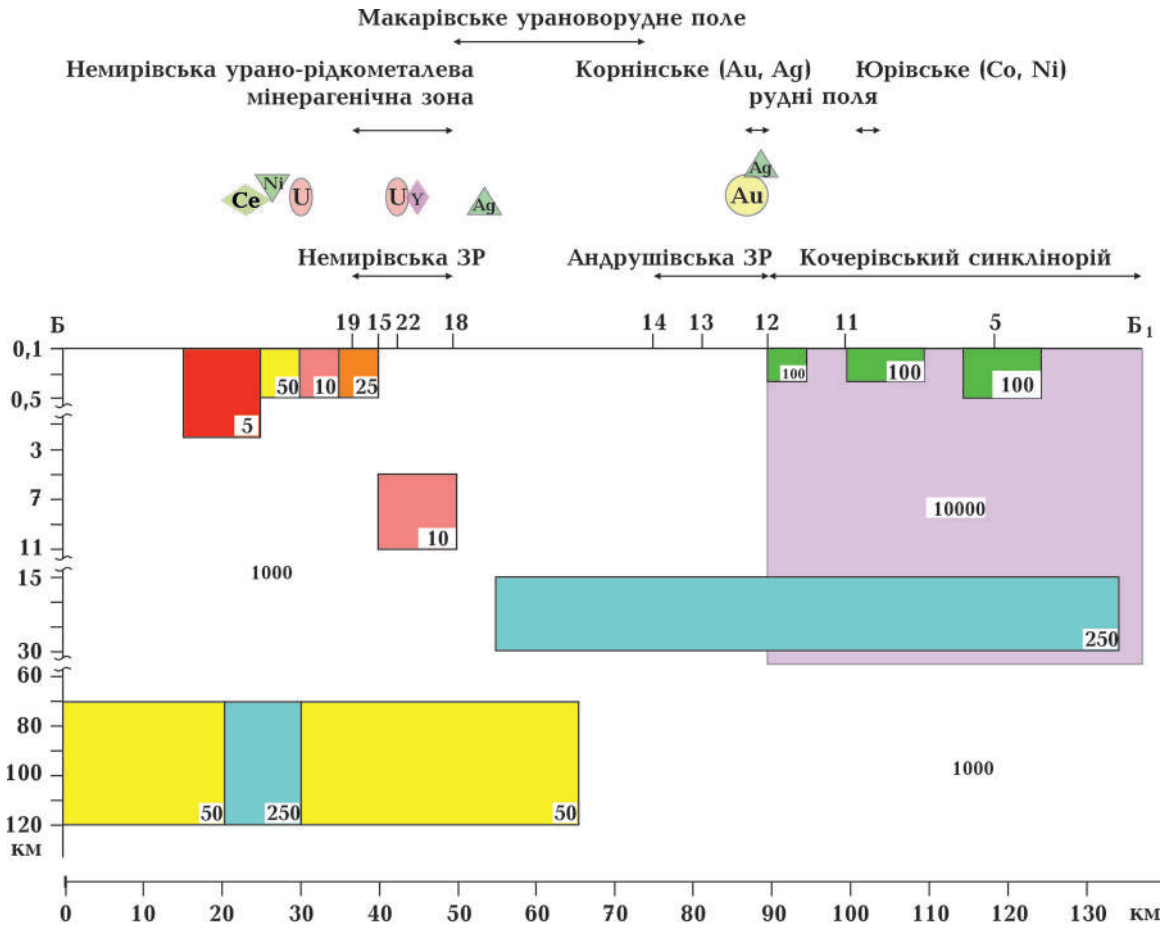
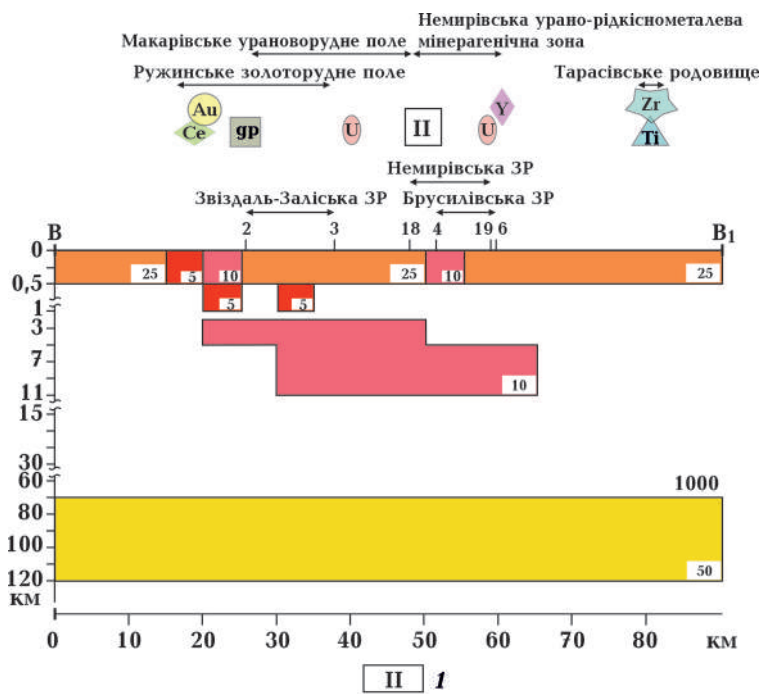


Рис. 5. Геоелектричні розрізи тривимірної моделі вздовж профілів А—А₁ по Звіздаль-Заліській ЗР, Б—Б₁ по Брусилівській ЗР, В—В₁ по Самгородському розлому: I — перспективні для подальшого вивчення ділянки (I — вздовж Звіздаль-Заліської ЗР; II — вздовж Самгородського розлому). Умовні позначення див. на рис. 1, 3, 4.

Fig. 5. Geoelectric sections of the three-dimensional model along the profiles: A—A₁ — along the Zvizdal-Zaliska, Б—Б₁ — along the Brusyliv FZ, and В—В₁ — along the Samgorod fault: I — promising areas for further study (I — along the Zvizdal-Zaliska FZ; II — along the Samgorod fault). Conventional designations see Fig. 1, 3, 4.



б
Рис. 5, б.



в
Рис. 5, в.

За геоелектричними критеріями вздовж Звездаль-Заліської ЗР можна виділити перспективну ділянку для подальшого детального вивчення — між Самгородським та Унавським розломами (див. рис. 5).

Б—Б₁. У межах планшета Брусилівська ЗР простежується на відстані 135 км та з півдня до пікету 75 км проходить у Росинському мегаблці, далі на північ є міжмегаблоковою (між Волинським і Росинським). При порівнянні розрізів із західним Звездаль-Заліським профілем є як загальні подібності, так і відмінності. До подібностей можна віднести відсутність єдиної витягнутої гальванічно зв'язаної структури на будь-якій глибині, але водночас у розрізі представлені приповерхневі та глибинні аномальні зони в земній корі та верхній мантії, які дають змогу також виділити в геоелектричному розрізі три частини. Більшість приповерхневих аномалій просторово приурочені до перетинів з Немирівською ЗР, Самгородським, Варварівським, Машеринським та Житомирським розломами. Відмінності: друга частина розрізу між Самгородським та Андрушівським розломами характеризується відсутністю приповерхневої серії аномалій; в третій не спостерігаються прояви рідкісноземельних металів; уздовж всього профілю не закартовано прояви графітизації.

В—В₁. Профіль простягається на відстань майже 90 км і перетинає із заходу на схід Подільський мегаблок (пікети 0—26 км), міжмегаблокову (в цьому районі) Звездаль-Заліську ЗР (пікети 26—38 км), Росинський мегаблок (пікети більші за 38 км), внутрішньо мегаблокові Немирівську (пікети 48—59 км) і Брусилівську (52—60 км) ЗР. Приповерхневі аномалії (від поверхні до 500 м) виявлено вздовж всього простягання профілю з ρ від 5 до 25 Ом·м. Найменшим опором характеризуються зони в районі Огіївського (західна межа Звездаль-Заліської ЗР, пікети 20—25 км) та Кочерівського (перетин Брусилівської та Немирівської ЗР, пікети 50—55 км) розломів. Перша з них ускладнена і занурюється до глибини 1 км зі зменшенням ρ від 10 до 5 Ом·м. В осьовій частині Звездаль-Заліської ЗР (пікети 30—35 км) профіль перетинає ще одну зону збільшення електро-

провідності (ρ від 25 до 5 Ом·м) потужністю до 1 км. Глибше від 0,5—1 до 70 км ρ відповідає «нормальному» значенню для щитів 1000 Ом·м. І тільки в частині профілю (пікети 20—65 км) верхня кромка глибинної локальної аномалії потужністю від 3 до 9 км ($\rho = 10$ Ом·м) занурюється із заходу на схід від 2 до 5 км. Основні перепади в потужності вздовж профілю спостерігаються в осьовій частині Звездаль-Заліської ЗР (пікети 30 км) і в зоні перетину Брусилівської та Немирівської ЗР (пікети 50 км). Саме між ними (пікети 30—50 км) потужність аномалії максимальна. Геоелектричний розріз ускладнений повсюдною аномалією ($\rho = 50$ Ом·м) у верхніх шарах верхньої мантії на глибинах від 70 до 120 км.

Профіль В—В₁ вздовж Самгородського розлому перетинає Ружинське золоторудне, Макарівське урановорудне поля, Немирівську урано-рідкометалеву зону (приурочені до тектоно-метасоматичних зон) і Тарасівське родовище титану та цирконію (див. рис. 4, 5). Прояви урану належать до уранокалієвої гідротермально-метасоматичної рудної формації і приурочені до зон розломів та вузлів їх перетинів. В останні роки розвивають уявлення про значну роль верхньої мантії в постачанні рудних компонентів різної металогенічної спеціалізації у складі мантійних флюїдів у процесі формування родовищ, включно з урановими [Калашник, 2013].

За геоелектричними критеріями вздовж Самгородського розлому можна виділити також перспективну ділянку для подальшого детального вивчення в зоні його перетину з Кочерівським і Таборівським розломами (див. рис. 5).

Висновки. За новими експериментальними геоелектромагнітними даними, які отримано Інститутами НАН України (2009—2019 рр.) [Геолого-геофизическая ..., 2009; Бурахович та ін., 2015; Ніколаєв та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019, 2020], побудовано глибинну тривимірну модель земної кори та верхньої мантії центральної частини Звездаль-Заліської та Брусилівської зон розломів УЩ, вивчено зв'язки між електропровідністю геоелектричних неоднорідностей Кочерівського синклінорію, Звездаль-Заліської, Бруси-

лівської, Немирівської ЗР та Самгородського розлому з їх структурними та металогенічними особливостями.

Загалом геолого-геоелектрична інтерпретація тривимірної моделі дала змогу, по-перше, виявити нові аномалії високої електропровідності в приповерхневій частині земної кори, які визначаються різною провідністю, глибиною залягання, конфігурацією і по-різному характеризують різні геологічні структури, по-друге, підтвердити та деталізувати регіональні аномалії як у глибинній частині земної кори, так і у верхах верхньої мантії.

Із великої кількості приповерхневих аномалій з низьким ρ від 5 до 100 Ом·м більшість занурюється до 500 м і тільки декілька перетинають глибину 1 км та простежуються до глибини 11 км. Показано, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської, Немирівської ЗР, Самгородського розлому та Кочерівського синклінорію. Більшість виділених провідників при тривимірному геоелектричному моделюванні проявляються мозаїчно вздовж протяжних ЗР та утворюють перемежовані ланцюжки високого та низького опору. Підкреслимо, що в центральній частині Звіздаль-Заліська ЗР проявилася на глибинах 15—30 км у земній корі як зона контакту аномальних високого та низького опорів.

Найімовірніше аномалії електропровідності пов'язані із зонами дезінтеграції порід кристалічного фундаменту, метасоматично перетворених порід, графітизації та можливої дегазації надр.

Нагадаємо, що питання про природу аномальної електропровідності в нижній частині земної кори та верхньої мантії заходу УЩ було розглянуто раніше на основі аналізу геофізичних і геохімічних даних у публі-

кації [Бурахович, Кулик, 2009]. Багато даних узгоджено свідчать про аномальність надр південної частини Волино-Подільської плити та заходу УЩ порівняно з нормальним розподілом фізичних параметрів у надрах докембрійських платформ. Було зроблено припущення, що комбінація електропровідних включень за рахунок графітизації та флюїду, що пов'язаний з процесами окиснення водню та вуглеводнів, які виділяються при дегазації мантії, утворюють гальванічну мережу провідних каналів та аномальні області високої електропровідності.

Аномалії електропровідності визначають імовірні зони прояву геодинамічних процесів, умови формування та місця локалізації родовищ корисних копалин. Виділені в цьому дослідженні аномалії простягаються вздовж видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітизованих порід, частина поверхневих аномалій приурочена до областей кори вивітрювання гірських порід. Більшість аномалій просторово відповідає рудопроявам, рудоносним полям і родовищам корисних копалин.

Геолого-геоелектричний аналіз моделі дав змогу 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.

Публікація містить результати досліджень, виконаних за прикладною темою № III-16-20: «Геофізичне дослідження літосфери південного заходу Східноєвропейської платформи та її обрамлення у зв'язку з глибиною дегазацією з метою виявлення шляхів міграції флюїдів» (2020—2022 рр.).

Список літератури

- Атлас «Геологія і корисні копалини України». Голов. ред. Л.С. Галецький. Київ: Вид. Ін-ту геол. наук НАН України, 2001. 168 с.
- Белявский В.В., Бурахович Т.К., Кулик С.Н., Сухой В.В. Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепроовско-Донецкой впадины. Киев: Знання, 2001. 227 с.
- 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>.
- Геолого-геофизическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита. Ред. А.В. Анциферов, Е.М. Шеремет, К.Е. Есипчук. Донецк: Вебер, 2009. 254 с.
- Комплексна металогенічна карта України масштабу 1 : 500 000 та пояснювальна записка до неї. Ред. С.В. Гошовський. Київ: Вид. УкрДГРІ, 2003.
- Державна геологічна карта України масштабу 1 : 200 000 аркуша М-35-ХVIII (Фастів). Київ: Геоінформ України, 2003.
- Державна геологічна карта України масштабу 1 : 200 000 аркуша М-35-ХХIV (Сквира). Київ: Геоінформ України, 2005.
- Зюльцде В. Звіт про геологічне довивчення масштабу 1 : 200 000 території аркуша М-35-ХХIV (Сквира) за 1998—2003 рр. Геологічна будова та корисні копалини басейну верхів'я р. Рось. ПДРГП «Північгеологія», 2003.
- Ильченко Т.В., Сологуб Н.В., Трипольский А.А., Чекунов А.В. Литосфера Центральной и Восточной Европы: Геотраверсы IV, VI, VIII. Киев: Наук. думка, 1988.
- Ільєнко В.А. Електропровідність зон розломів земної кори Кочерівської ділянки західної частини Українського щита: *автореф. дис. ... канд. геол. наук.* Київ, 2020, 22 с.
- 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. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177370.
- Ільєнко В., Бурахович Т., Кушнір А., Попов С., Омельчук О. МТ/МВ дослідження в зоні ендоконтакту Корнинського гранітного масиву. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія.* 2020. № 1(88). С. 46—52. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07>.
- Калашник Г.А. Глибинні фактори формування промислових родовищ урану Українського щита: *автореф. дис. ... д-ра геол. наук.* Київ, 2013. 40 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. Электромагнитні 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>.
- Нечаев С.В., Гинтов О.Б., Мычак С.В. О связи редкоземельной, редкометалльной и золоторудной минерализации с разломно-блоковой тектоникой Украинского щита. 1. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 1. С. 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158861>.
- Очерки геодинамики Украины. Под ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтов. Киев: ВІ ЕН ЕЙ, 2018. 466 с.
- Радзивилл А.Я. *Углеродистые формации и*

- тектономагматические структуры Украины. Киев: Наук. думка, 1994. 172 с.
- Рябенко В.А., Моськина О.Д., Злобенко И.Ф. *Углеродистые формации западной части Украинского щита*. Киев: Изд. ИГН АН УССР, 1980. 52 с.
- 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>.
- Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. *Очерки дегазации Земли*. Киев: БАДАТА-Интексервис, 2018. 632 с.
- Ширков Б.И., Бурахович Т.К. Електромагнітні методи при прогнозуванні рудопроявів корисних копалин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2017. № 4(79) С. 40—45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.06>.
- Ширков Б.И., Бурахович Т.К., Кушнир А.Н. Трёхмерная геоэлектрическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 1. С. 41—60. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94010>.
- Яценко В.Г. *Геология, минералогия и генезис графита украинского щита*. Киев: Логос, 2008. 127 с.
- Berdichevsky, M.N., & Dmitriev, V.I. (2008). *Models and Methods of Magnetotellurics*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 563 p.
- Cherevatova, M., Smirnov, M.Yu., Jones, A.G., & Pedersen, L.B. (2015). Magnetotelluric array data analysis from north-west Fennoscandia. *Tectonophysics*, 653, 1—19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.12.023>.
- 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>.
- Ilyenko, V.A., Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., & Nikolaev, Yu.I. (2019). MT/MV investigation of faulty tectonic zones of the western part of the Ukrainian Shield. *XVIIIth International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects»*. Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902106>.
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., & Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth, Planets and Space*, 51, 1127—1133. <https://doi.org/10.1186/BF03351586>.
- Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensopust, 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. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50258>.
- Mackie, R.L., & Booker, J. (1999). *Documentation form td3fwd and d3-to-mt*. GSY-USA Inc.
- Smith, R. (2014). Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012. *Surveys in Geophysics*, 35, 123—156.
- 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>.
- Vaittinen, K., Korja, T., Kaikkonen, P., Lahti, I., & Smirnov, M.Yu. (2012). High-resolution magnetotelluric studies of the Archean-Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland. *Geophysical Journal International*, 188(3), 908—924. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05300.x>.
- Zaher, M.A., Pirttijärvi, M., & Korja, T. (2017). Geophysical Studies of the Raahe-Ladoga Shear Complex in the Iisalmi Area of Finland. *Geophysica*, 52(2), 43—67.

Three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield

T.K. Burakhovych, V.A. Iliencko, A.M. Kushnir, 2022

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

To study the deep structure of the geoelectrically complex junction zone of three megablocks of the western part of the Ukrainian Shield (Volyn', Podil, and Ros'), a three-dimensional model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones was created. It is based on modern experimental observations of the Earth's natural low-frequency electromagnetic field in a wide range of periods. Synchronous experimental data of deep magnetotelluric sounding and magnetovariational profiling, obtained by the Institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2009—2019, were analyzed. The main issues of the geoelectrical modeling methodology using the Mtd3fwd software complex were considered, such as model elements, stages, alternative models, examples of calculations and comparison of observations, errors, etc. The constructed model analysis showed that of the large number of near-surface anomalies with low resistivity (5 to 100 Ohm · m), most sink to 500 m and only a few reach a depth of 1 km and are followed up to 11 km. It was established that there are connections between conductivity and structural features of the Zvizdal-Zaliska, Brusyliv, Nemyriv fault zones, the Samgorod fault and the Kocheriv synclinorium. Most of the isolated conductors appear in a mosaic pattern along the extended fault zones and form interspersed chains of high and low resistivity. Regional anomalies were confirmed and detailed both in the deep part of the crust and in the upper mantle; part of the Zvizdal-Zaliska fault zone appeared at depths of 15—30 km as a contact zone of abnormally high and low resistivities. Anomalies are confined to elongated zones of metasomatization and graphitized rock areas, some of the surface anomalies correspond to areas of the weathering crust. Most of the anomalies coincide with ore occurrences, ore-bearing fields and mineral deposits. The conducted geological-geoelectrical analysis of the model made it possible for the first time to identify two promising areas for further study that meet the geoelectrical criteria for the mineral search: along the Zvizdal-Zaliska fault zone between the Samgorod and Unava faults; along the Samgorod fault in the area of its intersection with the Kocheriv and Taboriv faults.

Key words: Ukrainian Shield, Zvizdal-Zaliska fault zone, Brusyliv fault zone, magnetotelluric sounding, magnetovariational profiling, three-dimensional geoelectrical model, conductivity anomalies, minerals.

References

- Galetskiy, L.S. (Ed.). (2001). *Atlas «Geology and minerals of Ukraine»*. Kyiv: Publ. of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 168 p. (in Ukrainian).
- Belyavskiy, V.V., Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., & Sukhoy, V.V. (2001). *Electromagnetic methods in the study of the Ukrainian Shield and the Dnieper-Donetsk depression*. Kiev: Znan-nya, 227 p. (in Russian).
- Burakhovich, 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. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 31(1), 88—99 (in Russian).
- Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., & Shirkov, B.I. (2015). Geoelectric anomalies of the Ukrainian Shield and their relation to mineral deposits. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(6), 42—63. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111171> (in Russian).
- Antsiferov, A.V., Sheremet, E.M., & Esipchuk, K.E. (Eds.). (2009). *Geological and geophysical model of the Nemirovsko-Kocherovskaya suture zone of the Ukrainian Shield*. Donetsk: Weber, 254 p. (in Russian).
- Goshovsky, S.V. (Ed.). (2003). *Complex metallogenic map of Ukraine on a scale of 1 : 500,000 and an explanatory note to it*. Kyiv: Publ. of UkrDGRI (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine, scale 1 : 200,000, sheet M-35-XVIII (Fastiv)*. (2003). Kyiv: Geoinform of Ukraine (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine, scale 1 : 200,000 sheet M-35-XXIV (Skyra)*. (2005). Kyiv: Geoinform of Ukraine (in Ukrainian).
- Zyultsle, V. (2003). *Report on the 1 : 200,000-scale geological survey of the territory of sheet M-35-XXIV (Skyra) for 1998—2003. Geological structure and mineral resources of the basin of the headwaters of the Ros River*. PDRGP «Northern Geology» (in Ukrainian).
- Ilchenko, T.V., Sologub, N.V., Tripolskiy, A.A., & Chekunov, A.V. (1988). *Lithosphere of Central and Eastern Europe: Geotraverses IV, VI, VIII*. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
- Ilyenko, V.A. (2020). Electrical conductivity of fault zones of the Earth's crust in the Kocheriv section of the western part of the Ukrainian Shield. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv, 22 p. (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 Russian).
- Ilyenko, V., Burakhovich, T., Kushnir, A., Popov, S., & Omelchuk, O. (2020). Magnetotelluric and magnetovariate researches in the endocontact area of korninsky granite array. *Visnyk Kyyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya*, (1), 46—52. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07> (in Ukrainian).
- Kalashnikov, G.A. (2013). Deep factors of the formation of industrial uranium deposits of the Ukrainian Shield. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv, 40 p. (in Ukrainian).
- Mychak, S.V., Bakarzhyyeva, 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, Yu.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).
- Nechaev, S.V., Gintov, O.B., & Mychak, S.V. (2019). On the relation between the rare-earth—rare-metal and gold ore mineralization and fault-block tectonics of the Ukrainian Shield. 1. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(1), 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158861> (in Russian).

- Starostenko, S.V., & Gintov, O.B. (Eds.). (2018). *Essays on the geodynamics of Ukraine*. Kyiv: VI EN EY, 466 p. (in Russian).
- Radziwill, A.Ya. (1994). *Carbonaceous formations and tectonomagmatic structures of Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka, 172 p. (in Russian).
- Ryabenko, V.A., Moskina, O.D., & Zlobenko, I.F. (1980). *Carbonaceous formations of the western part of the Ukrainian Shield*. Kyiv: Publ. of the Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences of USSR, 52 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., Gintov, O.B., & Kutas, R.I. (2011). Geodynamic development of the lithosphere of Ukraine and its role in the formation and location of mineral deposits. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(3), 3—22. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i3.2011.116919> (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Zgonnik, V.A., Makarenko, A.N., Larin, N.V., & Boguslavskiy, A.S. (2018). *Essays on the degassing of the Earth*. Kyiv: BADATA-Intekservis, 632 p. (in Russian).
- Shyrkov, B.I., & Burakhovich T.K. (2017). Electromagnetic methods for forecasting ore mineral resources occurrences. *Visnyk Kyivivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya*, (4), 40—45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.06> (in Ukrainian).
- Shyrkov, B.I., Burakhovich T.K., & Kushnir, A.N. (2017). Three-dimensional geoelectric model of the Golovanevsk suture zones of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 39(1), 41—60. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94010> (in Russian).
- Yatsenko, V.G. (2008). *Geology, mineralogy and genesis of graphite of the Ukrainian Shield*. Kiev: Logos, 127 p. (in Russian).
- Berdichevsky, M.N., & Dmitriev, V.I. (2008). *Models and Methods of Magnetotellurics*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 563 p.
- Cherevatova, M., Smirnov, M.Yu., Jones, A.G., & Pedersen, L.B. (2015). Magnetotelluric array data analysis from north-west Fennoscandia. *Tectonophysics*, 653, 1—19. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.12.023>.
- 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>.
- Ilyenko, V.A., Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., & Nikolaev, Yu.I. (2019). MT/MV investigation of faulty tectonic zones of the western part of the Ukrainian Shield. *XVIIIth International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects»*. Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902106>.
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., & Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth, Planets and Space*, 51, 1127—1133. <https://doi.org/10.1186/BF03351586>.
- Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensopust, 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. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50258>.
- Mackie, R.L., & Booker, J. (1999). *Documentation form td3fwd and d3-to-mt*. GSY-USAInc.
- Smith, R. (2014). Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012. *Surveys in Geophysics*, 35, 123—156.
- 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>.
- Vahtinen, K., Korja, T., Kaikkonen, P., Lahti, I., & Smirnov, M.Yu. (2012). High-resolution magnetotelluric studies of the Archean-Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland. *Geophysical Journal International*, 188(3), 908—924. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05300.x>.
- Zaher, M.A., Pirttijärvi, M., & Korja, T. (2017). Geophysical Studies of the Raahe-Ladoga Shear Complex in the Iisalmi Area of Finland. *Geophysica*, 52(2), 43—67.