

## Електромагнітні дослідження західної частини Українського щита

*І.Ю. Ніколаєв<sup>1</sup>, А.М. Кушнір<sup>2</sup>, В.А. Ільєнко<sup>2</sup>, Ю.І. Ніколаєв<sup>1</sup>, 2019*

<sup>1</sup>Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка  
НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Надійшла 19 лютого 2019 р.

Представлены результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных исследований по профилям Радомышль—Фастов и Ружин—Сквира, выполненных в 2015 г., при изучении глубинного строения земной коры в западной части Украинского щита с целью поисков зон метасоматоза и связанных с ними рудопроявлений полезных ископаемых. Получены типперы для периодов геомагнитных вариаций от 20 до 3700 с и кривые удельного кажущегося сопротивления для периодов от 10 до 10 000 с. По качественной интерпретации комплексных типперов и кривых МТЗ на профиле Радомышль—Фастов выделены три локальные аномальные структуры, приуроченные к пересечению отдельных частей субмеридиональных разломов (Виленского, Кочеровского и Брусиловского) с системой субширотных второстепенных разломов. Анализ кривых МТЗ свидетельствует о неоднородной трехмерной ситуации на всей площади исследования. В центре Кочеровской синклинальной структуры предполагается наличие высокопроводящей зоны, верхняя кровля которой залегает на глубине 20—50 км. На профиле Ружин—Сквира выделены локальная высокопроводящая поверхностная аномалия (Звиздаль-Залесская зона разломов); приповерхностная, возможно, соответствует Самгородскому разлому второго порядка и ограничена с запада Огиевским, а с востока — Великоерчиловским глубинными разломами. Аномалии высокой электропроводности приурочены к рудоносным полям редкометалльных пегматитов (Папирнянскому, Толстовскому и Кочеровскому) и вольфрамовому (Поташнянскому). Аномалии тяготеют к зонам распространения метасоматитов и метасоматически измененных пород, перспективных на эндогенное оруденение: скарнов (Вольнский мегаблок Украинского щита); грейзенов и зон эпидотизации, окварцевания (Кочеровский синклинорий); зон окварцевания и микроклинизации (Звиздаль-Залесская разломная зона); зон хлоритизации, микроклинизации, эпидотизации и гидротермального изменения пород Брусиловской разломной зоны; зон мусковитизации, эпидотизации и окварцевания (Росинский мегаблок щита).

**Ключевые слова:** МТ/МВ исследования, аномалии электропроводности, Украинский щит, рудопроявления.

**Вступ.** Сучасні геоелектричні моделі земної кори Українського щита (УЩ) характеризуються великою кількістю аномалій електропровідності різного масштабу як у плані, так і за глибиною [Logvinov, 2015; Бурахович и др., 2015; Кулик, Бурахович, 2007]. В останніх посиланнях подано параметри тривимірної моделі Коростенської та Чернівецько-Коростенської ано-

малій у західній частині щита. Зони підвищеної електропровідності часто пов'язані з ендегенним зруденінням [Геолого-геофізические ..., 2011; Бурахович и др., 2015].

У 2008 р. на території аркушів М-35-ХVІІІ (Фастів) і М-35-ХХІV (Сквира) [Державна ..., 2003, 2005] з метою побудови геоелектричних моделей та виділення площ, перспективних для подальших пошукових і

геологорозвідувальних робіт, були проведені профільні аудіо- (АМТЗ) і магнітоеліричні зондування (МТЗ) [Геолого-геофизическая ..., 2009]. Матеріали цієї статті є логічним продовженням досліджень 10-річної давнини.

У межах Чернівецько-Коростенської аномалії високої електропровідності на території зазначених аркушів розміщується Немирово-Кочерівська шовна зона (НКШЗ) [Анциферов та ін., 2009], південною частиною якої є Брусилівська міжблокова шовна зона (БМШЗ). Її розглядають як буферну зону між Волинським і Подільським (із заходу) та Білоцерківським (зі сходу) мегаблоками УЩ, по якій, як по трансформному розлому, могли відбуватися вертикальні та горизонтальні переміщення [Геолого-геофизические ..., 2011].

Щодо назв мегаблоків західної частини УЩ, їх положення та розмірів, наявності тих чи інших структурних елементів досі тривають дискусії. Згідно зі схемою [Кореяційна ..., 2004; Державна ..., 2003, 2005], на заході УЩ розміщуються Волинський (Північно-Західний), Дністровсько-Бузький (Подільський), Росинсько-Тікицький (Білоцерківський) мегаблоки. Волинський і Подільський мегаблоки розділяє Андрушівська зона розломів.

Слід зауважити, що основну роль у тектонічному районуванні УЩ відіграють саме геофізичні дослідження [Гінтов та ін., 2018]. За більш ніж 60-річну історію застосування на УЩ геофізичних методів з'являються нові експериментальні дані, удосконалюються методи обробки даних. На думку авторів [Гінтов та ін., 2018], за геофізиками має бути вирішальний голос у питаннях розломно-блокової тектоніки. Так, на підставі аналізу геофізичних даних запропоновано (аркуши М-35-ХVIII і М-35-ХХIV): "... Дністровсько-Бузький мегаблок розділити на Подільський та Бузький Немирівською зоною розломів, північну межу Подільського мегаблока проводити по Тетерівській та Сарненсько-Варварівській зонах розломів, межу між Росинсько-Тікицьким, Волинським і Подільським мегаблоками проводити по Звездаль-Заліській зо-

ні розломів ...". Також зазначено, що на офіційних тектонічних схемах і картах не має бути місця для БМШЗ.

**Геолого-геоелектричний опис.** При плануванні геоелектричних робіт було використано матеріали [Державна ..., 2003, 2005], геологічну будову та структурно-тектонічне районування подано відповідно до цих документів.

Особливістю мегаблоків західної частини УЩ є неоднорідність складу в меридіональному напрямку: південна частина містить метаморфічні породи гранулітової фазії, а північна — амфіболітової; змінюється і склад магматичних утворень, особливо гранітоїдів. На півдні вони представлені ендербіт-чарнокітовою асоціацією і гранат-біотитовими (з кордієритом) гранітами, а на півночі — нормальними амфібол-біотитовими і біотитовими гранодіоритами і гранітами. У північній частині шовної зони в глибоководних умовах нагромаджена вулканогенно-осадова товща кочерівської світи, не дуже сильно метаморфізована і не мігматизована. На півдні мегаблоків характерною є потужна (до 55—60 км) земна кора базальтоїдного складу. В її розрізі виділено дуже потужну товщу (до 30 км) коромантійної суміші. На півночі, у межах Білоцерківського мегаблока, потужність кори зменшується до 43—47 км. У межах Волинського та Подільського мегаблоків потужна кора базальтового типу (на півдні до 60 км) до півночі дещо тоншає (до 50 км), під Коростенським плутоном — до 38 км.

У супракрустальному розрізі кори мегаблоків виділено два структурні поверхи: нижній складений палеоархейськими породами дністровсько-бузької серії (гнейси і кристалосланці з прошарками кальцифірів, залістих і безрудних кварцитів), верхній — неоархейськими породами росинсько-тікицької (гнейси і амфіболіти, кристалосланці) і палеопротерозойської тетерівської серій (мармури, кальцифіри, гнейси і кристалосланці). Верхня частина тетерівської серії (переважно карбонатно-амфіболітова кочерівська світа) поширена тільки у межах БМШЗ. Палео-

протерозойські метаморфічні породи провані шереметівськими плагіогранітами, дуже неоднорідним за складом житомирським комплексом гранітоїдів.

Найдавнішими магматичними породами є мафіт-ультрамафіти сабарівського комплексу у межах Білоцерківського мегаблока. До неогархею (а можливо, частково і до палеопротерозою) відносять основні та ультраосновні породи юрівського і чарнокітоїди літинського комплексів, плагіограніти тетіївського комплексу. Палеопротерозой представлений діоритами і плагіогранітами звенигородського, гранітами уманського, бердичівського та житомирського комплексів, габро-діорит-монзонітовою формацією букинського і габро-діорит-гранітною — фастівського комплексів.

Головними елементами розломної тектоніки досліджуваної території є Звездаль-Залеська, Брусилівська, Немирівська, Центральна та Андрушівська (рис. 1) глибинні зони розломів.

Північна частина НКШЗ представлена Кочерівською структурою, що обмежена зі сходу Вільшанським і Брусилівським, із заходу — Віленським і Кочерівським розломами. Південніше (аркуш М-35-XXIV (Сквира)), східним обмеженням шовної зони слугує Великоєрчиківський розлом (продовження Вільшанського), Брусилівська зона розломів входить до складу НКШЗ. На заході шовна зона відділяється від Подільського мегаблока Огіївським [Державна ..., 2005], а за [Геолого-геофизическая ..., 2009], — Погребищенським розломами, Звездаль-Залеська зона розломів входить до складу БМШЗ.

Згадані вище глибинні розломи швидше за все є транспортними каналами, якими з мантиї піднімалися флюїди, що несли тепло і рудні компоненти. Точки Ti-Zr-рудопроявів і Ta-Nb-зруденіння тяжіють, головним чином, до глибинних розломів — Віленського, Центрального, Погребищенського, Брусилівського, Великоєрчиківського (рис. 1). Прояви золоторудної мінералізації приурочені до зони Центрального розлому, радіоактивних металів — до зони перетину Немирівської та Централь-

ної зон розломів. Усі глибинні розломи характеризуються проявами прирозломного метасоматозу — утворення кварц-сульфідних жил у вмісних породах, формування польовошпатових метасоматитів, а також зон грейзенізації. Цілий ряд рудопроявів і точок мінералізації Ta і Nb, Be, Sn і W пов'язаний з польовошпатовими метасоматитами, зонами скарнування і грейзенізації, приуроченими до субмеридіональних зон розломів — Кочерівської, Брусилівської і Центральної, та Віленського розлому. Значна частина рудопроявів Be, Sn і W пов'язана зі скарнами і кварц-польовошпатовими метасоматитами, молібдену — з окварцуванням у комплексі з аномаліями золота, міді, цинку, срібла.

За схемою металогенічного районування території України [Комплексна ..., 2003], регіон досліджень належить до металогенічної провінції УЩ і охоплює частково Волинську, Дністровсько-Бузьку та Росинсько-Тикицьку субпровінції. У докембрійському фундаменті відомі точки мінералізації та окремі рудопрояви чорних, кольорових і благородних металів (Fe, Ti, Cu, Ni, Co, Zn, Mo, Cr, Pb, Au), рідкісних (Ta, Nb, W, Sn, Bi, Y, Li, Rb, Cs, Be) й радіоактивних елементів (Th, U), прояви керамічного пегматиту, мусковіту, графіту та ін. В осадовому чохла розміщуються розширені прояви цирконію, титану, золота, рідкісноземельних елементів, керамзитових глин, мергелю. З магматичними та метасоматичними породами, що їх супроводжують, пов'язані рудопрояви рідкісних металів, молібдену.

На південному сході регіону відомі Володарське та Північнобережнянське родовища заліза, що пов'язані з покладами залістистих кварцитів володарсько-білоцерківської товщі, Тарасівське родовище титану і цирконію, Північнобережнянське родовище урану. Територію аркушів вважають перспективною для розвідки нових рудопроявів і родовищ корисних копалин.

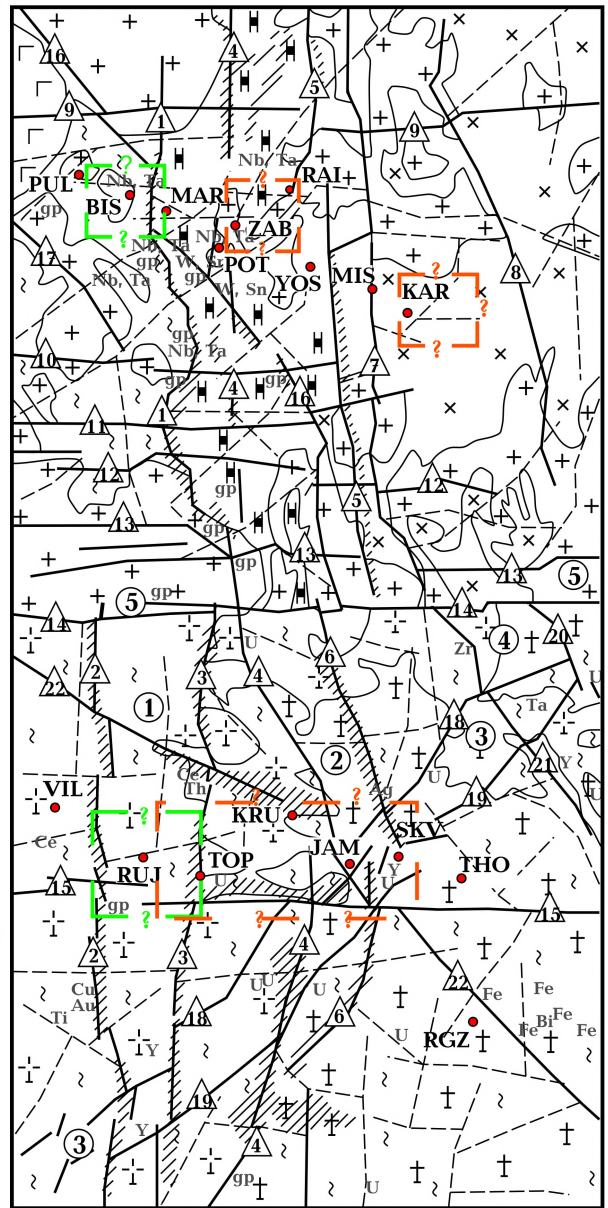
У рамках створення геолого-геофізичних моделей [Геолого-геофизическая ..., 2009] регіональних зон метасоматозу в межах УЩ для пошуків рудопроявів корисних ко-

палін було проведено магнітотелуричні та магнітоваріаційні (МТ/МВ) дослідження уздовж трьох профілів (Сквирівського, Фастівського та Макарівського), що попере­к простягання перетинають основні гли­бинні тектонічні структури НКШЗ.

Перші профільні електрометричні до­слідження на території шовної зони вико­нували (разом з магнітометрією масшта­бу 1 : 50 000) починаючи з 1958 р., метою яких було забезпечення пошуків залізних руд [Геолого-геофизическая ..., 2009]. Че­рез 10 років геофізичні дослідження тери­торії стали комплексними. МТЗ та магні­товаріаційне профілювання (МВП) про­водили відомі дослідники — С. Г. Кремер, А. І. Інгеров, А. І. Білинський, О. П. Бонда­ренко, О. І. Трегубенко та ін.

Аналіз перших кривих МТЗ показав не­суттєву зміну позірного електричного опо­ру в усьому діапазоні періодів, зі спадни­ми гілками, на періодах більш як 1000 с [Бурьянов и др., 1987]. Автори також від­значали відсутність у земній корі й верх­ній мантії провідних шарів.

У міру накопичення матеріалу уявлен­ня про геоелектричний розріз регіону змі­нювались. Було отримано сотні кривих МТЗ і параметрів МВП [Ingerov et al., 1999]. За існуючою на цей час тривимірною геоелект­ричною моделлю західної частини УЩ [Бу­рахович, Кулик, 1999] доведено, що шов­на зона на площі досліджень є перехідною між високою та низькою електропровід­ностями в земній корі у межах складної будови Чернівецько-Коростенської аномалії. Були виділені провідники у верхній мантії та зроблено висновок щодо аномаль­



Г	1	+	2	∩	3	Н	4	×	5
⊥ ∩	6	⊥ ∩	7	⊥ ∩	8	/	9	/	10
● VII	11	▨	12	□	13	□	14		

Рис. 1. Геолого-структурна схема району проведення геоелектричних досліджень [Державна ..., 2003, 2005]. Структурно-речовинні формації: 1 — габро-анортозити; 2 — граніти; 3 — гнейси і кристалосланці; 4 — мармури, кальцифіри, кристалосланці, гнейси і амфіболіти; 5 — амфіболіти і гнейси з інтрузіями мафіт-ультрамафітів і плагіогранітоїдів; 6 — плагіограніт-мігматити; 7 — граніт-мігматити; 8 — плагіограніт-плагіомігматити; 9 — глибинні та головні розломи; 10 — інші тектонічні порушення; 11 — пункт МТЗ/МВП; 12 — зони метасоматозу; аномалії електропровідності: 13 — поверхневі, 14 — приповерхневі. Корисні копалини позначено символами хімічних елементів: Fe, Ti, W, Cu, Sn, Zr, Bi, Nb, Ta, Au, Ag, Ce, Y, U, Th; графіт — гр. Глибинні тектонічні зони (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.

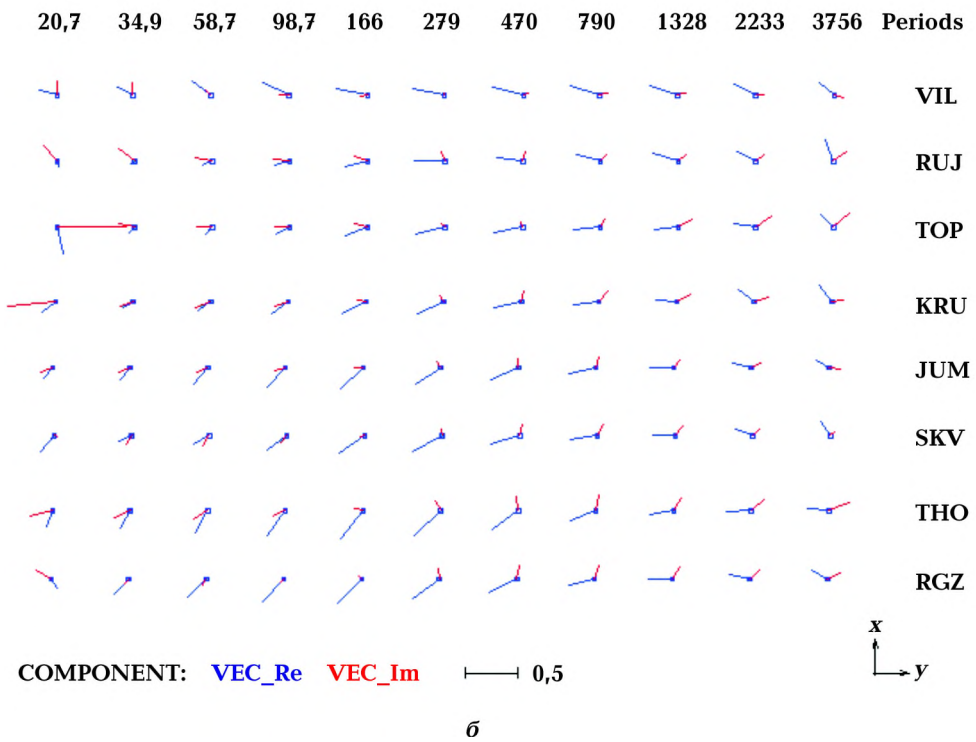
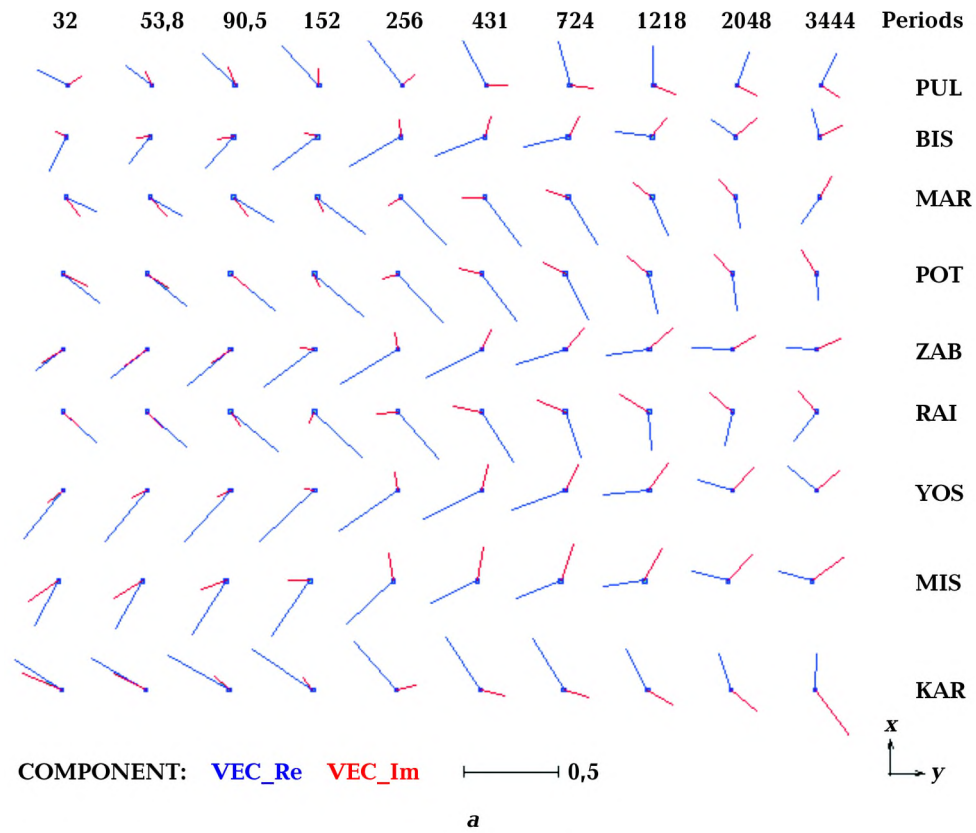


Рис. 2. Спостережені реальні та уявні компоненти типера за даними МВП для періодів геомагнітних варіацій від 20—30 до 3400—3700 с. Профілі: а — Радомишль—Фастів, б — Ружин—Сквира; RGZ — базовий МТ/МВ пункт спостереження Рогізна.

ності надр порівняно з розподілом фізичних параметрів усього УЩ.

**Експериментальні МТ/МВ дослідження 2015 р.** Експериментальні роботи виконували на сучасних довгоперіодних цифрових станціях з ферозондовими магнітометрами LEMI-417. Низькочастотне природне змінне електромагнітне поле Землі іоносферно-магнітосферного походження вимірювали уздовж двох профілів, що перетинають Звездаль-Заліську та Брусилівську зони розломів на території мегаблоків УЩ: Волинського — профіль Радомишль—Фастів у 9 пунктах, Подільського — профіль Ружин—Сквира у 7 пунктах. Тривалість синхронних спостережень становила 1 добу, відстань між профілями — в середньому близько 60 км; між польовими пунктами — від 4 до 13 км. На профілі Радомишль—Фастів, що простягається з північного заходу на південний схід у межах між Звездаль-Заліською та Брусилівською зонами розломів, розташовані пункти: Бистріївка (BIS), Мар'янівка (MAR), Поташі (POT), Забілоччя (ZAB), Раївка (RAI); на заході — Пилиповичі (PUL); на сході — Йосипівка (YOS), Містечко (MIS), Карашин (KAR). Профіль Ружин—Сквира простягається майже субширотно, пункт Ружин (RUJ) розташований саме на Звездаль-Заліській зоні розломів, а інші пункти, за винятком Вільнопілля (VIL), на сході від неї: Топори (TOP), Кривошівці (KRU), Ями (JAM), Сквира (SKV), Тхорівка (THO). За базовий МТ/МВ пункт було прийнято польовий пункт Рогізна (RGZ) на півдні Подільського мегаблока УЩ на відстані близько 30 км від профілю Ружин—Сквира.

Експериментальні роботи задовольняли вимоги, що висуваються до спостережених даних, при використанні процедури синхронного оцінювання передавальних операторів МТ/МВ полів програмним комплексом PRC-MTMV [Варенцов, 2013].

Суттєвий розкид амплітудних і фазових значень імпедансу та позірною електричного опору ( $\rho_{\text{п}}$ ), отриманий на польовому пункті, може бути зменшений в результаті синхронних досліджень і нормування на дані базового пункту, що статистично

приводить до зменшення дисперсії значень та згладжування кривих МТЗ. Отримані надійні оцінки типерів для періодів ( $T$ ) геомагнітних варіацій від 20 до 3700 с, амплітудних та фазових значень імпедансу і  $\rho_{\text{п}}$  від 10 до 10 000 с.

Максимум частотних характеристик для пунктів профілю Радомишль—Фастів припадає на період  $T = 200 + 500$  с (рис. 2, а). Орієнтація як реальних ( $\text{Re}W$ ), так і уявних ( $\text{Im}W$ ) компонент суттєво різняться не тільки в просторі, а й залежно від періоду  $T$  геомагнітних варіацій.

На крайньому західному пункті PUL напрямленість  $\text{Re}W$ , залежно від  $T$ , змінюється від північно-західної (для  $T = 30 + 500$  с) до північно-східної (для  $T > 2000$  с). Величина  $\text{Re}W$  у середньому становить 0,2—0,3. Величина  $\text{Im}W$  дорівнює майже третині  $\text{Re}W$ , кут між ними становить здебільшого  $90^\circ$ , що якісно свідчить про тривимірну геоелектричну ситуацію.

У наступному пункті BIS  $\text{Re}W$  змінює орієнтацію на південно-західну на  $T = 800$  с і зі збільшенням  $T > 800$  с розвертається на північ, її величина дорівнює 0,2—0,3. На  $T = 800$  с  $\text{Im}W$  мають суттєво менші значення (0,05—0,15), можливо припустити їх колінеарність з  $\text{Re}W$ . Зі збільшенням  $T$  компоненти типера майже досягають однакових значень, кут між ними дорівнює  $90^\circ$ . Комплексні типери в пунктах MAR, POT та RAI подібні, але суттєво відрізняються від суміжних (на заході BIS, між POT і RAI у пункті ZAB, та на сході YOS).  $\text{Re}W$  мають південно-східну орієнтацію — від 0,2 до 0,3, колінеарність з  $\text{Im}W$  майже в усьому діапазоні періодів, крім пункту RAI, де кут на  $T > 2000$  с наближається до  $90^\circ$ .

Особливою поведінкою виділяються комплексні типери в пункті ZAB. Тут  $\text{Re}W$  розвертаються відносно орієнтації стрілок у пунктах POT на південному заході та RAI — на північному сході, мають південно-західний (для  $T = 800$  с) і західний ( $T > 800$  с) напрямки. Співвідношення величин  $\text{Im}W$  та  $\text{Re}W$  змінюється від 1 : 4 до 1 : 1 залежно від періоду  $T$ , спостерігається колінеарність стрілок в усьому діапазоні  $T$ .

Така різка зміна поведінки типерів та

їх невеликі значення (до 0,2) на незначній за площею території свідчать про наявність декількох чергованих поверхневих струмопровідних структур субмеридіонального простягання, можливо, в районах розташування пунктів BIS та MAR, по-перше, та ZAB, RAI, по-друге.

У пунктах YOS та MIS  $\text{ReW}$  залежно від періоду  $T$  розвертаються від південного заходу на північний захід, їх значення 0,2—0,5. Якщо на  $T$  до 200 с компоненти типера можна вважати колінеарними, то зі збільшенням  $T$  кут між ними прагне до  $90^\circ$ , величина їх майже зрівнюється. Ще раз зміна орієнтації типерів на північний захід спостерігається в пункті KAR, величини  $\text{ReW} \sim 0,4$  та  $\text{ImW} 0,1—0,3$ , компоненти колінеарні. Можна припустити наявність локальної провідної приповерхневої структури, зорієнтованої з південного заходу на північний схід, яка відображається у напрямку типера в цьому пункті.

Таким чином, за якісною інтерпретацією комплексних типерів профіль Радомишль—Фастів можна розділити на декілька ділянок за орієнтацією струмопровідних структур: 1) між пунктами PUL та MAR — поверхнева, орієнтацію важко визначити на цьому етапі аналізу матеріалу, вона може бути як субмеридіональною, так і північно-східною або субширотною; 2) між пунктами ZAB та RAI — приповерхнева, субмеридіонального простягання; 3) на південному сході від пункту KAR — приповерхнева північно-східна.

На профілі Ружин—Сквира частотна характеристика індукційних параметрів (рис. 2, б), а саме компоненти  $\text{ReW}$ , зростає від 0,1—0,2 на  $T = 30$  с до максимальних значень 0,4 на  $T = 200—300$  с, а потім зі збільшенням  $T$  зменшується до значення 0,2. Значення  $\text{ImW}$  майже в усіх пунктах профілю дуже малі, їх зростання до значень  $\text{ReW}$  спостерігається тільки на  $T = 1500$  с. Уздовж профілю орієнтація  $\text{ReW}$  на  $T = 200$  с змінюється від північно-західної в пункті VII до південно-західної, починаючи з пункту KRU. Між ними в пунктах RUJ та TOP значення майже нульові, а орієнтацію важко визначити, тому, ймовірно, саме в цьо-

му місці профілю проходить осьова частина приповерхневої аномалії електропровідності субширотної (східно-східно-північного) простягання. Слід зазначити, що на  $T < 30$  с  $\text{ImW}$ , а можливо, і  $\text{ReW}$  у пунктах RUJ, TOP, KRU зазнають значного впливу техногенних перешкод різної природи, незважаючи на процедуру RR (віддалена база розташована в пункті RGZ), яку передбачає програма обробки електромагнітного поля PRC\_MTMV [Варенцов, 2013]. У діапазоні  $T 300—1000$  с компоненти  $\text{ReW}$  між пунктами RUJ (північно-західна орієнтація) і THO (південно-західна орієнтація) спрямовані на захід, тому можна припустити, що вісь струмопровідної структури занурюється в тій частині профілю, де розташовані пункти TOP, KRU, JAM, SKV. На  $T = 1300$  с  $\text{ReW}$  в усіх пунктах профілю орієнтована на північний захід і швидше за все відображає нормальне вмісне середовище. Кут між  $\text{ReW}$  та  $\text{ImW}$  тяжіє до  $90^\circ$  у пунктах RUJ, TOP, KRU, що може свідчити про неоднорідну тривимірну ситуацію на глибині.

Таким чином, на профілі Ружин—Сквира якісний аналіз типерів передбачає аномальну струмопровідну структуру субширотної орієнтації, яка з поверхні в західній частині заглиблюється на схід, де, можливо, описується складним розподілом телуричних токів.

Побудовані амплітудні та фазові криві відповідають напрямкам вимірювальних ліній (вісь  $x$  орієнтована на північ,  $y$  — на схід). Ліва частина кривих  $\rho_{\Pi}$  в інтервалі  $S$  (сумарна поздовжня провідність) містить інформацію про інтегральну електропровідність першого приповерхневого шару. На всіх кривих майже відсутня ліва висхідна гілка, і тільки за перепадом рівня  $\rho_{\Pi}$  на перших  $T$  можна припустити значення  $S$  осадових відкладів ( $S_{oc}$ ) — від 5 до 70 См, крім пункту MAR, де  $S_{oc} \sim 150$  См.

Практично на всіх пунктах профілю Радомишль—Фастів відсутня конформність кривих МТЗ, розбіжність кривих  $\rho_{\Pi}$  за напрямками вимірювальних ліній характерна для всього частотного діапазону та збільшується з періодом і становить у середньо-

му 0,5—3 порядки, більшість кривих лежать вище або нижче глобальних даних, що свідчить про значні гальванічні ефекти.

У пункті PUL криві для різної поляризації перетинаються на  $T = 150$  с. Якщо крива  $\rho_{\text{плху}}$  характеризується явно вираженою

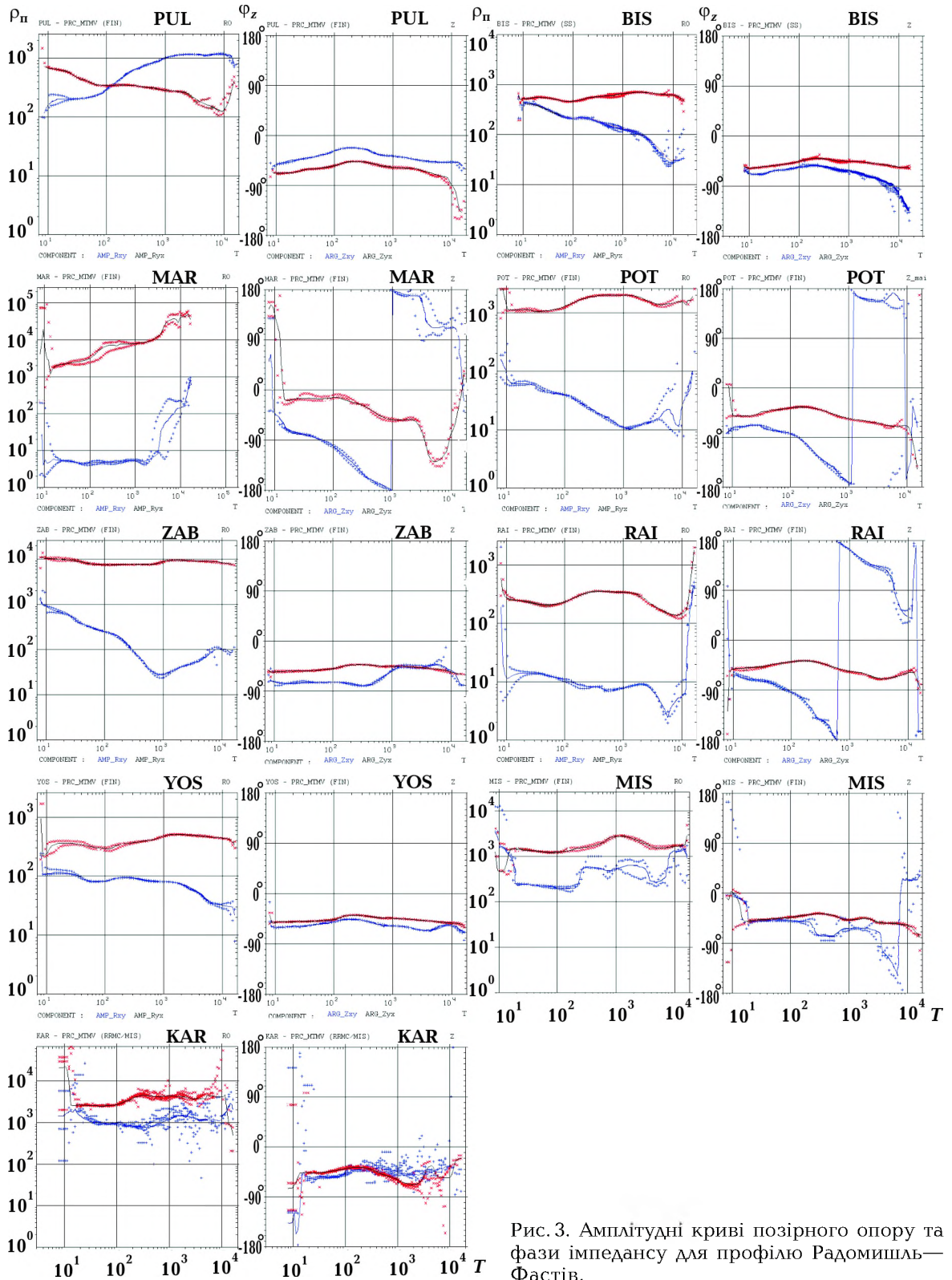


Рис. 3. Амплітудні криві позірного опору та фази імпедансу для профілю Радомишль—Фастів.



висхідною гілкою від 200 (для  $T=10$  с) до 1000 Ом·м (для  $T=10\,000$  с), то крива  $\rho_{\Pi yx}$  — спадною гілкою від 800 до 200 Ом·м і виходить на глобальну криву (рис. 3).

Криві  $\rho_{\Pi}$  для різної поляризації в пункті BIS мають однаковий рівень на  $T=10$  с, що становить 400—500 Ом·м. Зі збільшенням  $T$  до 10 000 с крива  $\rho_{\Pi xy}$  спадає до 30 Ом·м, а крива  $\rho_{\Pi yx}$  коливається близько 500 Ом·м з невеликим максимумом 700 Ом·м на  $T=2000 \div 3000$  с.

У пункті MAR криві для різної поляризації характеризуються значною розбіжністю, майже на 3 порядки в усьому частотному діапазоні. Вони є висхідними гілками для  $\rho_{\Pi yx}$  від 1000 до 20 000 Ом·м, для  $\rho_{\Pi xy}$  — від 4 до 100 Ом·м. Значний градієнт  $\rho_{\Pi}$  від 10 до 1000 Ом·м та від  $1 \cdot 10^4$ — $5 \times 10^4$  Ом·м у діапазоні  $T$  від 3000 до 10 000 с може мати насправді неприродний характер і бути пов'язаним, по-перше, з впливом техногенних факторів, по-друге, з не-

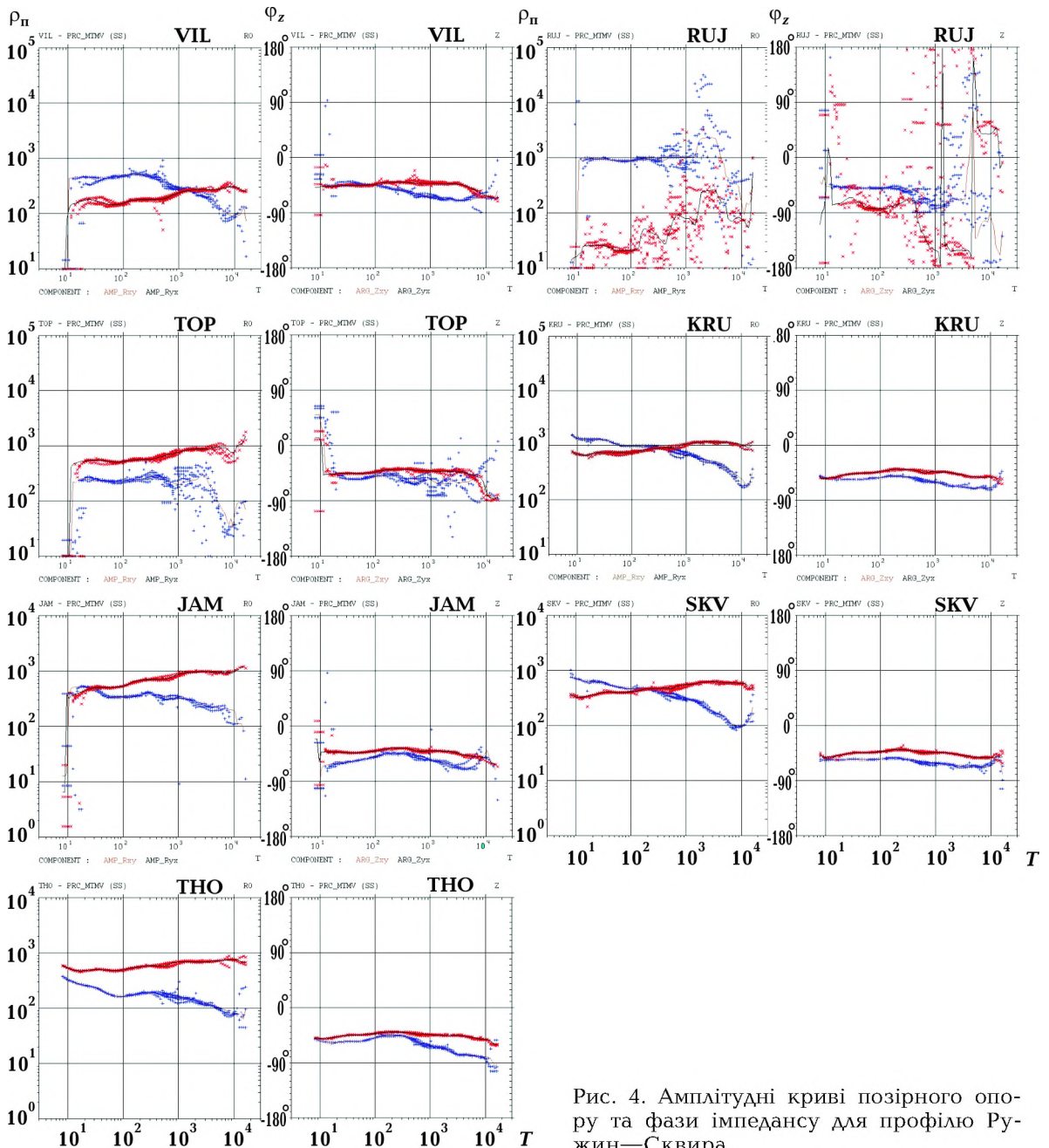


Рис. 4. Амплітудні криві позірного опору та фази імпедансу для профілю Ружин—Сквира.

доврахуванням неоднорідності джерела природного електромагнітного поля, сферичної симетрії Землі та з неприпустимістю обробки спостережених даних у рамках моделі Тихонова—Кан'яра.

Аналогічною є ситуація з кривими МТЗ у пунктах POT, ZAB та RAI: розбіжність кривих  $\rho_{\Pi}$  для різної поляризації становить від одного до більш як двох порядків;  $\rho_{\Pi xy}$  характеризуються спадною гілкою: від 70 до 10 Ом·м, від близько 1000 до 30 Ом·м, від 10 до 8 Ом·м у діапазоні періодів від 10 до 1000 с. Саме на  $T=800+1000$  с спостерігаються мінімальні значення  $\rho_{\Pi}$ , формальна інтерпретація припускає наявність високопровідної зони, верхня кромка якої коливається на рівні 20—50 км,  $S$  до 5000 См. Інша поляризація представлена високими значеннями  $\rho_{\Pi}$  в усьому частотному діапазоні 500— $10^4$  Ом·м. Так само, як в пункті MAR, спостерігається значний градієнт  $\rho_{\Pi}$  на  $T=5000$  с. Його пояснення на  $T=5000$  с може бути таким самим, як у пункті MAR. Аналіз кривих свідчить про неоднорідну тривимірну ситуацію як на поверхні, так і на глибині.

Поведінка кривих МТЗ у пунктах YOS, MIS та KAR суттєво різняться, розбіжність кривих не більша за один порядок в усьому частотному діапазоні, вони коливаються на рівні  $10^2$ — $10^3$ . Незважаючи на синхронний польовий запис і двоточкову обробку, якість отриманих кривих МТЗ (особливо для поляризації  $\rho_{\Pi xy}$ ) у пунктах MIS та KAR низька, тому індивідуальна інтерпретація є ускладненою.

Фази імпедансу для профілю Радомишль—Фастів у середньому менші за  $-45^\circ$ , різниця фаз імпедансів для різної поляризації сягає від  $20^\circ$  у пунктах PUL, BIS, ZAB, YOS, MIS та KAR до більш як  $90^\circ$  у пунктах MAR, POT та RAI, де  $\phi_{xy}$  проходить через всі квадранти, здійснювали майже повний оберт фази. Дисперсні співвідношення для трансформації кривих  $\rho_{\Pi}$  у фазові строго доведені для одновимірної моделі Тихонова—Кан'яра. Довгі роки це було одним із спірних питань магнітотелурики, а саме існування дисперсних співвідношень для двовимірних і тривимірних моделей

[Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Можливо, є структури, які створюють  $\rho_{\Pi}$  та фази імпедансу, що не пов'язані між собою перетворенням Гілберта. У нашому випадку в останніх пунктах амплітудні криві та фази імпедансу не відповідають одна одній. Існують приклади, коли виявлено порушення дисперсного співвідношення, яке характерне для моделей суперпозицій структур, що містять локальну приповерхневу неоднорідність над глибинною регіональною структурою [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. І саме для центральної частини профілю в пунктах MAR, POT та RAI за аналізом амплітудних кривих, їхньою невідповідністю фазовим кривим, специфічною поведінкою фазових кривих можна припускати при інтерпретації суперпозицію структур різного порядку на різних глибинних рівнях.

Таким чином, як і при аналізі МВ-досліджень, за попереднім розглядом кривих МТЗ припускаємо наявність уздовж профілю декількох ділянок, які різняться розподілом питомого опору: 1) під пунктом BIS — субвертикальна структура; 2) пункти MAR, POT, ZAB та RAI — складна тривимірна структура, в якій можливі локальні та регіональні неоднорідності.

Криві МТЗ профілю Ружин—Сквира (рис. 4) суттєво відрізняються від кривих на попередньому профілю. Тут рівень  $\rho_{\Pi}$  від 100—1000 Ом·м залишається однако-вим майже в усьому частотному діапазоні для всіх кривих МТЗ, крім пункту RUJ, де на коротких  $T$  криві для різних поляризацій розходяться майже на два порядки. За характером поведінки частотної залежності  $\rho_{\Pi xy}$  та  $\rho_{\Pi yx}$  криві вздовж профілю можна поділити на дві групи. До першої належать криві МТЗ у пунктах VII, RUJ, KRU, SKV, для яких характерно таке: на коротких  $T$  від 10 до 30—1500 с рівень  $\rho_{\Pi yx}$  (від 30 до 800 Ом·м) нижчий за рівень  $\rho_{\Pi xy}$  (від 500 до 2000 Ом·м); зі збільшенням  $T$  криві за напрямками вимірвальних ліній перехреснюються і  $\rho_{\Pi yx}$  (від 150—1000 Ом·м) лежить вище, ніж  $\rho_{\Pi xy}$  (10—1000 Ом·м, за рахунок пункту RUJ); розходження між кривими становить пів-

порядку. Співвідношення кривих для різних поляризацій у пункті RUJ аналогічне, але крива  $\rho_{\text{пух}}$  в усьому діапазоні, а  $\rho_{\text{пху}}$  на  $T$  понад 600 с визначаються з великою похибкою, розкид якої сягає більшого порядку, але залишається тенденція поведінки, а саме можливого перетину кривих на великих періодах  $T$ . До другої групи належать криві у пунктах TOP, JAM та TNO (вони розташовані південніше від першої групи). Цим кривим властива така поведінка: відсутність перетину кривих для різної орієнтації вимірювальних ліній, збільшення розходження рівня  $\rho_{\text{п}}$  зі збільшенням періоду;  $\rho_{\text{п}}$  від 400—700 Ом·м для поляризації  $\rho_{\text{пух}}$  зростає до 900—1000 Ом·м, а для поляризації  $\rho_{\text{пху}}$  зменшується до 30—200 Ом·м.

На профілі Ружин—Сквира кут  $\varphi$  змінюється у широкому діапазоні, для  $T$  менше 1000 с — від  $-40^\circ$  до  $-70^\circ$ , зі збільшенням  $T$  фази здебільшого має нижчі значення — від  $-50^\circ$  до  $-90^\circ$  (див. рис. 4), що вказує на наявність глибинної високопровідної зони. Незважаючи на незначну похибку визначення кута  $\varphi$  (крім пункту RUJ, де якість запису низька та параметри обробки важко піддаються інтерпретації), криві  $\varphi$  не завжди відповідають амплітудним кривим.

Аналіз кривих МТЗ уздовж профілю Ружин—Сквира дає змогу виділити декілька структур: локальну поверхневу провідну зону в околі пунктів RUJ та, можливо, TOP, які розташовані у Звиздаль-Заліській зоні розломів; приповерхневу субширотну, що, напевно, заглиблюється на схід і може відповідати геологічній структурі, а саме Самгородському розлому другого порядку; регіональну (або її вплив) для всіх пунктів профілю.

#### **Обговорення результатів і висновки.**

У результаті дослідження виявлено поверхневі та приповерхневі низькоомні аномалії різного простягання, що ще раз підтверджує тезу про складну геолого-тектонічну будову регіону — зони між Волинським, Подільським та Росинським мегаблоками УЩ.

За якісною інтерпретацією комплекс-

них типерів і кривих МТЗ уздовж профілю Радомишль—Фастів можна виділити аномалії електропровідності неглибокого залягання. Перша (I) — поверхнева, може бути як субмеридіональною, що корелює з Віленським розломом, так і північно-східною або субширотною та пов'язаною з системою локальних розломів субширотного простягання, які перетинають Віленський та Кочерівський розломи й Кочерівську структуру. Друга (II) — приповерхнева субмеридіонального простягання, яка корелює з районом перетину: по-перше, зі згаданою вище субширотною системою локальних розломів, по-друге, із субмеридіональною структурою, яку оконтурюють із заходу Кочерівський, а зі сходу Брусилівський глибинні розломи. Третя (III) — на південний схід від профілю — приповерхнева північно-східного простягання, яка збігається із зоною перетинів локальних розломів різної орієнтації в просторі.

Аномалії високої електропровідності, що виділені на профілі Радомишль—Фастів, тяжіють до зон поширення метасоматитів і метасоматично змінених порід у відомих рудоносних полях. Так, у межах аномалії I розміщується Папірнянське рудоносне поле рідкіснометалевих пегматитів (Nb-Ta-рудопрояви Папірнянський-1, Мар'янівський) — у зоні Віленського розлому, воно асоціює з проявами мікроклінізації, альбітизації, грейзенізації та скарнування. В межах аномалії II розміщуються два рудоносні поля рідкіснометалевих пегматитів: 1) Товстовське (Nb-Ta-рудопрояви Товстовський-1 та Товстовський-2), яке знаходиться у південно-західному екзоконтакті Товстовського масиву гранітів житомирського комплексу, в зоні перетину Кочерівського субмеридіонального розлому з розломом північно-східного простягання; 2) Кочерівське — розміщується в осевій частині однойменної зони розломів, у східному облямуванні Кочерівського і Забілочівського гранітних масивів (Nb-Ta-рудопроїв Забілочівський); на південному заході межі аномалії II знаходиться Поташнянське вольфрамове рудоносне поле, яке пов'язане із скарнами і скарнованими кар-

бонатними породами кочерівської світи (W-Sn-рудопрояв Забілочівський) та розміщується в межах західних екзоконтактів Забілочівського та Кочерівського масивів гранітів житомирського комплексу. Аномалія III відповідає зоні контакту уманських гранітів й звенигородських діоритів і тектонічному порушенню, що проходить південно-східніше.

Аналіз кривих МТЗ на усіх пунктах свідчить про неоднорідну тривимірну ситуацію на всій площі дослідження. У центрі Кочерівської синклінальної структури передбачається наявність високопровідної зони, покривля якої залягає на рівні 20—50 км. Ці дані підтверджують існування регіональної Чернівецько-Коростенської аномалії електропровідності.

На профілі Ружин—Сквира виділено декілька аномалій: IV — локальна високопровідна поверхнева, яка знаходиться у Звездаль-Заліській зоні розломів, просторово збігається з Мовчанівським рудопроявом урану (пункт TOP) і ділянками окварцування та мікроклінізації; V — приповерхнева субширотна, що, напевно, заглиблюється на схід і може відповідати геологічній структурі, а саме Самгородському розлому другого порядку, до перетинання якого зі Звездаль-Заліською та Брусилівською глибинними тектонічними зонами приурочені прояви рідкісноземель-

них металів (Вільнопільський — метали церієвої групи, Сквирський — метали ітрієвої групи) та урану (Мовчанівський та Домантівський прояви). Припускаємо наявність (або вплив) регіональної аномалії для всіх пунктів профілю. Природа аномалій високої електропровідності може бути пояснена наявністю графітовмісних гнейсів і вмістом сульфідів.

Слід підкреслити, що профілі проходять у межах різних мегаблоків УЩ. Геоелектричні дослідження відображують різну глибинну будову — різний розподіл позірної опору та інших електромагнітних параметрів. Так, на Волинському мегаблоці локальні аномалії приурочені до перетину окремих субмеридіональних розломів (Віленського, Кочерівського та Брусилівського) із системою субширотних дугорядних розломів. На Росинському мегаблоці виділено просторову аномалію завширшки 20—25 км (завдовжки 5 км, північна та південна межі не встановлені), яку оконтурюють субмеридіональні Огіївський та Великоєрчиківський глибинні розломи; між ними за даними [Державна ..., 2005] виділено БМШЗ.

Території виявлених аномалій потребують детальніших досліджень геолого-геофізичними та геохімічними методами як перспективні на пошуки ендегенних корисних копалин.

### Список літератури

- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.
- Бурахович Т. К., Кулик С. Н. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель западной части Украинского щита. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 6. С. 77—79.
- 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>.
- Бурьянов В. Б., Гордиенко В. В., Загородняя О. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М., Шуман В. Н. Геофизическая модель тектоносферы Европы. Киев: Наук. думка, 1987. 184 с.
- Варенцов И. М. Программная система PRC\_MTMV для обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований: Материалы VI Всероссийской школы-семинара по ЭМ зондированиям им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна. Новосибирск: Изд. ИНГТ СО РАН, 2013. С. 1—4.
- Геолого-геофизическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита. Под ред. А. В. Анциферова. Донецк: Вебер, 2009. 253 с.

- Геолого-геофизические критерии рудоносности и металлогения областей субдукции Украинского щита. Под ред. В. А. Анциферова. Донецк: Вебер, 2011. 285 с.
- Гінтов О. Б., Орлюк М. І., Єнтін В. А., Пашкевич І. К., Мичак С. В., Бакаржієва М. І., Шимків Л. М., Марченко А. В. Структура західної і центральної частин Українського щита. Співнічні питання. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 6. С. 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>.
- Державна геологічна карта України масштабу 1 : 200 000. Аркуш М-35-ХVIII (Фастів). Київ: Геоінформ України, 2003. 136 с.
- Державна геологічна карта України масштабу 1 : 200 000. Аркуш М-35-ХХIV (Сквира). Київ: Геоінформ України, 2005. 135 с.
- Комплексна металогенічна карта України масштабу 1 : 500 000 та пояснювальна записка до неї. Під ред. С. В. Гошовського. Київ: Вид. УкрДГРІ, 2003. 336 с.
- Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита. Пояснювальна записка. Київ: УкрДГРІ, НСК України, 2004. 30 с.
- Кулик С. Н., Бурахович Т. К. Трёхмерная геоэлектрическая модель земной коры Украинского щита. *Физика Земли.* 2007. № 4. С. 21—27.
- 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>.
- Logvinov, I. M. (2015). Deep Geoelectrical Structure of the Central and Western Ukraine. *Acta Geophysica*, 63 (5), 1216—1230. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0049>.

## Electromagnetic studies of the western part of the Ukrainian Shield

*I. Yu. Nikolaev, A. M. Kushnir, V. A. Ilyenko, 2019*

Results of synchronous magnetotelluric and magnetovariation researches along profiles Radomyshl—Fastiv and Ruzhin—Skvira conducted in 2015 for studying the deep structure of crust of the western part of the Ukrainian Shield, on purpose of search the zones of metasomatism and the related ore occurrences minerals are given. Tippers for the periods of geomagnetic variations from 20 to 3700 s and curves of apparent resistance from 10 to 10 000 s are received. According to high-quality interpretation of complex tippers and MTZ curves on a profile Radomyshl—Fastiv three local abnormal structures are allocated confined to crossing of separate parts of the submeridional faults, such as Vilensky, Kocherivsky and Brusilivsky with the system of sublatitudinal minor faults. The analysis of MTZ curves confirms the non-uniform three-dimensional situation on all the area of research. In the center of Kocherivska sinclinal structure the existence of a high-conductivity zone which roof lies at a depth of 20—50 km is supposed. On a profile Ruzhin—Skvira the following anomalies are recognized: the local high-conductivity surface which is situated in the Zvizdal-Zaliska fault zone; the near-surface one which goes deep to the east along the profile and can correspond to the geological structure, namely the Samgorodsky fault of the second order, and it is limited from the west by Ogiyvsky, and from the east by Velikoyerchikivsky deep faults. Anomalies of high electrical conductivity are spatially confined to the known ore-bearing fields — Papirnyanske, Tovstovske and Kocherivske of the rare metal pegmatites and Potashnyanske tungsten ore field. The anomalies allocated spatially coincide with the zones of distribution of metasomatism and metasomatically changed rocks which are promising for endogenic mineralization, namely skarn in the Volynsk megablock; greisens and zones of epidotization, quartzitization in Kocherivsky synclinoriums; zones of quartzitization and mikroklinization of the Zvizdal-Zaliska faults zone; zones of chloritization, mikroklinization, epidotization and hydrothermal change of rocks of the Brusilivska fault zone; zones of a muskovitization, epidotization and quartzitization of the Rosinsky megablock.

**Key words:** MT/MV methods, anomalies of electrical conductivity, Ukrainian Shield, ore occurrences.

References

- Berdichevskiy, M.N., & Dmitriev, V.I. (2009). *Models and methods of magnetotelluric*. Moscow: Nauchnyy Mir, 680 p. (in Russian).
- Burakhovich, T.K., & Kulik, S.N. (1999). Quasi three-dimensional geoelectric model western part of Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 21 (6), 77—79 (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. *Ceofizicheskiy zhurnal*, 37 (6), 42—63. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111171>. (in Russian).
- Buryanov, V.B., Gordienko, V.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kulik, S.N., Logvinov, I.M., & Shuman, V.N. (1987). *Geophysical model of tectonosphere Europe*. Kiev: Naukova Dumka, 184 p. (in Russian).
- Varentsov, I.M. (2013). Software system PRC\_MTMV for data processing of synchronous MT/MV soundings: *Proc. of the VI All-Russian Workshop on EM sounding named after M.N. Berdichevsky and L.L. Vanyan* (pp. 1—4). Novosibirsk: Publ. Institute of Petroleum Geology and Geophysics. A. A. Trofimuk SB RAS (in Russian).
- Antsiferov, A.V. (Ed.). (2009). *Geological and geophysical model Nemirovskaya-Kocharovskaya suture zone of the Ukrainian Shield*. Donetsk: Weber, 253 p. (in Russian).
- Antsiferov, A.V. (Ed.). (2011). *Geological and geophysical criteria for ore-bearing and metallogeny of the subduction areas of the Ukrainian Shield*. Donetsk: Weber, 285 p. (in Russian).
- Gintov, O.B., Orlyuk, M.I., Entin, V.A., Pashkevych, I.K., Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Shymkiv, 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).
- Geological state map of the crystalline base of the scale of 1 : 200 000. Sheet M-35-XVIII (Phas-tiv). (2003). Kiev: Foundation of GP "Ukrainian Geological Company" (in Ukrainian).
- Geological state map of the crystalline base of the scale of 1 : 200 000. Sheet M-35-XXIV (Skvira). (2005). Kiev: Foundation of GP "Ukrainian Geological Company" (in Ukrainian).
- Hoshovskyy, S.V. (Ed.). (2003). *Complex metallogenic map of Ukraine scale 1 : 500 000 and explanatory note*. Kyiv: Puhl. UkrDGRI, 336 p. (in Ukrainian).
- Correlation chronostratigraphic scheme of early Precambrian of Ukrainian Shield. Explanatory note. (2004). Kyiv: Puhl. UkrDHRI, NSK Ukrainy, 30 p. (in Ukrainian).
- Kulik, S.N., & Burakhovich, T.K. (2007). Three-dimensional geoelectric model of the crust of the Ukrainian Shield. *Fizika Zemli*, (4), 21—27 (in Russian).
- 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>.
- Logvinov, I.M. (2015). Deep Geoelectrical Structure of the Central and Western Ukraine. *Acta Geophysica*, 63 (5), 1216—1230. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0049>.