

Тривимірна глибинна геоелектрична модель Тарасівської структури Голованівської шовної зони

© Т. К. Бурахович, В. А. Іл'єнко, А. М. Кушнір, Б. І. Ширков, 2018

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 23 січня 2018 р.

В 2017 г. в центральной части Ятранского блока Голованевской шовной зоны выполнены площадные синхронные измерения внешнего переменного низкочастотного естественного электромагнитного поля Земли и построение трехмерного глубинного распределения удельного сопротивления в земной коре Тарасовской структуры (48°32' с.ш., 30°37' в.д.). Анализ экспериментальных данных (кривые глубинного магнитотеллурического зондирования для диапазона периодов 10—10000 с и комплексные индукционные параметры для периодов 20—6900 с) свидетельствует о сложной трехмерной ситуации, которая предусматривает наличие поверхностной и, возможно, глубинной электропроводящей аномалии. По результатам трехмерного моделирования Тарасовская структура фрагментарно проявляется в низком электрическом сопротивлении ρ , ее субширотно пересекают электропроводящие зоны с различным ρ , в которых именно низкие значения от 10 Ом·м на юге до 100 Ом·м на севере находятся в ее контуре. В вертикальном разрезе структуру можно представить в виде нескольких слоев: первый — электропроводящий с $\rho=10\div 250$ Ом·м — с поверхности до 10 м (севернее 48°30') и 100 м (южнее 48°30'), скорее всего, связан не только с высокой электропроводностью поверхностных осадочных отложений, но и с зоной дезинтеграции пород кристаллического фундамента; второй — высокого сопротивления с $\rho=10\ 000$ Ом·м — с 100 м до 2 км может быть представлен однородной недифференцированной толщей; третий — электропроводящий с $\rho=10\div 250$ Ом·м с 2—3 км до 10 км, вероятно, может объясняться особым составом пород земной коры на этих глубинах (графитизацией, сульфидизацией и т. д.) или флюидизацией различного происхождения. Все чаще по последним данным природу аномалий рассматривают как результат совместного влияния электронного и ионного типов электропроводности.

Ключевые слова: Голованевская шовная зона, 3D геоэлектрическая модель, МТ/МВ методы, аномалии электропроводности.

Вступ. Шовні зони — унікальні геологічні структури. Їм властиві особлива будова структурних поверхів, прояви активних геодинамічних процесів і наявність багатого набору корисних копалин. Шовні зони щитів і давніх платформ найчастіше проявляються як зони підвищеної електропровідності, які супроводжуються родовищами цинку, свинцю, золота та міді (Австралія [Lilley et al., 2001; Wannamaker, 2005; Fon, 2011], Нова Зеландія [Wannamaker et al., 2001]), алмазів (Африка [Birt et al., 1997; Khoza et al., 2013а,б]), Північна Америка [Jones et al., 2001; Brasse et al., 2002; Spratt et al., 2009]) та ін.

Основний результат геоелектричних досліджень Українського щита (УЩ) — виявлення численних локальних і регіональних аномалій електропровідності, низькоомних глибинних аномалій уздовж протяжних зон розломів, у шовних зонах, приурочених до зон метасоматозу, спряженість низькоомних аномалій з металогенічними рудними вузлами і геохімічними аномаліями [Бурахович и др., 2015а, б].

Голованівська шовна зона (ГШЗ) УЩ характеризується дуже складною в геоелектричному сенсі структурою, яка є похідною від геолого-тектонічної обстановки у цьому регіоні [Геолого-геофизическая...,

2008]. З одного боку, власне шовна зона, яка витягнута у квазімеридіональному напрямку, проходить під добре електропровідними осадовими відкладами Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) на півночі і Причорноморської — на півдні. Остання має субширотне простягання, тоді як ДДЗ — діагональне, з північного заходу на південний схід. ГШЗ складається з двох істотно різних частин: широкої південної і вузької північної; крім того, зони розломів і межі блоків шовної зони в основному субмеридіональні. Подібну орієнтацію має і потужна регіональна глибинна Кіровоградська аномалія електропровідності. У такій складній в геоелектричному розумінні ситуації часто дані магнітотелуричного зондування (МТЗ) і магнітоваріаційного профілювання (МВП) не збігаються, і їх тлумачення можливе тільки з використанням підходів тривимірної інтерпретації за допомогою розв'язання прямої (моделювання) або оберненої (інверсія) задачі геоелектрики.

Природа аномалій електропровідності ГШЗ, погляди щодо якої підтверджені та набули подальшого розвитку [Ширков та ін., 2017; Николаев и др., 2014; Burakhovych, Shyrkov, 2012], може бути зумовлена графітизацією та сульфідизацією, що пов'язані з наявністю залізорудних родовищ переважно карбонатно-залізисто-кременисто-метабазитової формації і родовищ залізисто-кременистої формації, що містять рудопрояви графіту, хрому і нікелю, родовища і рудопрояви урану і золота в лужних метасоматитах, кобальту, платиноїдів; аномалії підвищеної електропровідності в земній корі на глибинах 10—30 км і у верхах верхньої мантії (від 50 до 70—120 км) пояснюють процесами сучасної флюїдизації.

Установлено [Геолого-геофизическая..., 2008; Ширков, Бурахович, 2017], що низькоомні аномалії переважно приурочені до зон метасоматозу уздовж протяжних зон розломів на сході ГШЗ і до районів поширення графітизованих гнейсів і сланців у західній частині шовної зони; у їхніх межах розміщуються більшість родовищ

і рудопроявів рудних корисних копалин, зокрема Савранське і Капітанівське рудні поля, Молдовське, Секретарське, Лащівське, Новоселицьке родовища залізних руд, Заваллівське родовище графіту, Південне, Лозуватське і Калинівське родовища урану, Майське родовище золота, а також рудопрояви графіту, урану (Голованівське, Шамраївське, Коханівське), титану, золота, залізних руд, літію, міді, кобальту, хрому, нікелю (Демов'ярське) та ін.

У статті [Гинтов и др., 2016, с. 22—23] сформульовано завдання подальших наукових геофізичних досліджень з вивчення та оцінювання перспектив рудності ГШЗ. Одна з них: «...выявить и изучит несистемные локальные геолого-геофизические объекты на территории ГШЗ, которые могут потенциально нести специфическую рудную нагрузку (алмазонность, редкие и цветные металлы)». Показано, що перспективними при цьому є ізометрично-овальні структури різних генетичних типів, наприклад, Молдовська, Секретарська, в районі с. Таужне, Троянська і Тарасівська.

Мета роботи — вивчення геоелектричними методами зовнішнього змінного низькочастотного природного електромагнітного поля Землі та побудова тривимірного глибинного розподілу питомого опору в земній корі Тарасівської структури (48°32' пн.ш., 30°37' сх.д.) блоково-підвернутого генетичного типу, яка, за даними [Гинтов та ін., 2016], є масивом ультра- і метабазитів, кальцифірів і двопіроксенових кристалосланців, що перетинаються та повертаються зонами зсуву.

Сучасні експериментальні МТ/МВ-дослідження. Історія вивчення регіону геоелектричними методами навіть протягом дуже короткого часу зазнала суттєвих змін. Огляд попередніх і сучасних досліджень ГШЗ методами МТЗ та МВП проаналізовано у статті [Бурахович, Ширков, 2015] з посиланнями на публікації [Ингеров и др., 1988а,б; Кулик та ін., 1989; Ingerov et al., 1999; Геолого-геофизическая..., 2008].

Сучасні експериментальні МТ/МВ-дослідження в ГШЗ виконуються почина-

ючи з 2007 р. [Геолого-геофизическая..., 2008; Бурахович, Ширков, 2015; Бурахович та ін., 2015; Бурахович и др., 2015а; Ширков и др., 2017], за допомогою цифрових магнітотелуричних станцій LEMI-417.

Польові дані було оброблено на основі програмного комплексу PRC_MTMV [Варенцов, 2013]. Отримано криві ГМТЗ (амплітудні та фазові) для діапазону періодів (T) 10—10000 с і типери для T від 64 до 4096 с. Хоча обробка PRC_MTMV дає змогу отримувати діаграми передавальних операторів МТ-поля, візуалізацію здійснювали в системі координат північ—південь — схід—захід, оскільки зміни геоелектричних параметрів краще проявляються у перпендикулярному до простягання напрямку, а для ГШЗ характерні в основному субмеридіонально (уздовж осі x) витягнуті тектонічні структури. За наборами псевдорозрізів найінформативніших компонент функцій відгуку наочно відображено отримані результати, особливо для виділення у просторі локальних зон високої електропровідності.

Загалом більшість аномалій підвищеної електропровідності співвідносяться з головними тектонічними елементами ГШЗ, а саме з локалізацією глибинних зон розломів [Ширков и др., 2017]. Характерна особливість псевдорозрізів по профілю Первомайський — наявність вузьких зон високої електропровідності з позірним опором ($\rho_{\text{п}}$) до 10 Ом·м, які знаходяться на відстані 8—14, 40—42, 78—82 км, мінімумами фаз імпедансу (φ_z) на рівні $-75^\circ \dots -90^\circ$ [Бурахович, Ширков, 2015], що просторово збігаються із зонами розломів: Тальнівською, поміж Молдовською та Довгопрістанською, із західною межею Первомайської відповідно. Крім того, слід виділити аномалію високої електропровідності на відстані 60 км (проявляється яскравіше у субширотному напрямку), яка збігається з Ємилівською (Краснополянською) зоною розломів, що виходить на Троянську структуру, однотипну з Тарасівською (рис. 1).

За просторовим розподілом передавальних операторів МТ-поля у статтях [Бурахович, Ширков, 2015; Бурахович и др.,

2015а] якісно оцінено електропровідність ГШЗ. Так, це наявність яскравих аномалій амплітудних значень $\rho_{\text{п}}$, що збігаються з глибинними розломними зонами УЩ: Подільською, Тальнівською, Гвоздавською, Владіївською, Первомайською, Ємилівською, поміж Молдавською та Довгопрістанською. За фазовими кривими вони виділяються лише фрагментарно.

Основні особливості розподілу величин типерів відповідають регіональній тектонічній будові і великим геоелектричним неоднорідностям у земній корі досліджуваної території, а саме пов'язані з впливом високої провідності осадових відкладів Причорноморської западини і потужної регіональної Кіровоградської аномалії електропровідності.

Якісна характеристика експериментальних даних дає змогу припустити як субширотну, так і субмеридіональну орієнтацію поверхневих і глибинних аномалій електропровідності [Ширков и др., 2017]. Привести до задовільного зіставлення кривих $\rho_{\text{п}}$ (рівень $\rho_{\text{п}}$ для напрямку південь—північ більший за 1000 Ом·м, схід—захід — 10—100 Ом·м в усьому частотному діапазоні) можливо за субширотної орієнтації в просторі окремих гальванічно зв'язаних об'єктів у верхній частині розрізу: 1) між Лисянським та Ятранськими блоками ГШЗ (профіль Уманський); 2) західним продовженням Суботсько-Мошоринської субширотної зони розломів (профіль Первомайський). Водночас аналіз експериментальних даних МВП припускає наявність субмеридіональних структур підвищеної електропровідності, які відповідають саме Тальнівській і Первомайській зонам розломів ГШЗ.

Сучасні експериментальні МТ/МВ-дослідження Тарасівської структури. У 2017 р. в центральній частині Ятранського блока ГШЗ, у районі Тарасівської структури, виконано площові польові роботи методами глибинного МТЗ (ГМТЗ) і МВП. Кількість точок вимірювань із синхронним записом — 7, відстань становить від 1 до 2,5 км (рис. 1, вставка). Три пункти спостережень розташовано саме в Тарасівській

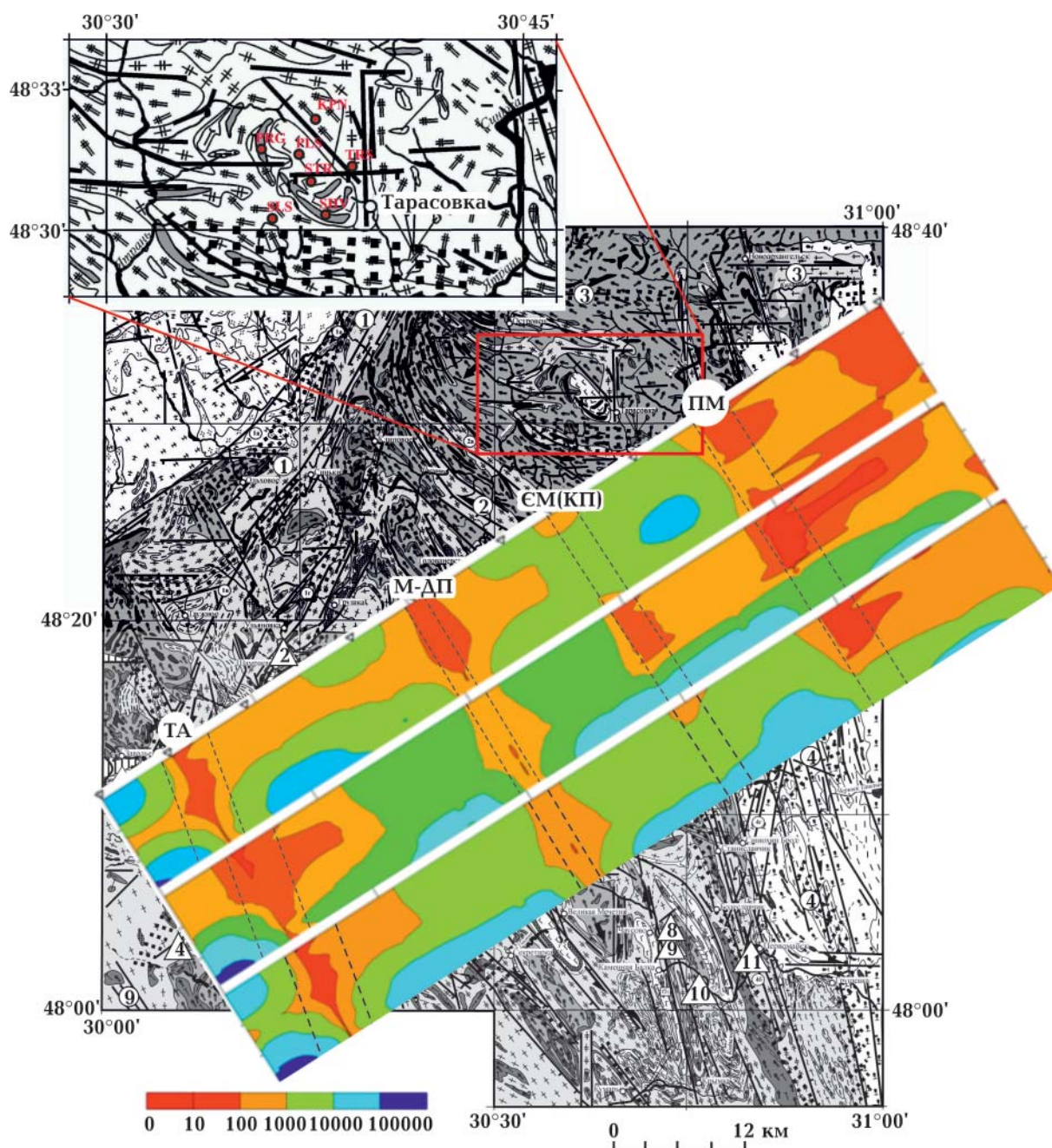


Рис. 1. Розподіл позірнього електричного опору (вертикальна шкала — у логарифмічному масштабі) субмеридіональної, субширотної та ефективної кривих МТЗ по профілю Первомайський на геолого-структурній карті поверхні кристалічного фундаменту центральної частини ГШЗ [Гинтов и др., 2016] і контур району 3D геоелектричної моделі Тарасівської структури (вставка). Зони розломів: ТА — Тальнівська, М-ДП — між Молдовською та Довгопристанською, ЄМ(КП) — Ємільвська (Краснополянська), ПМ — Первомайська. На вставці — пункти спостережень МТЗ і МВП (2017 р.) Тарасівської структури: Польовий стан (PLS), Тарасівська (STR), Шевченко (SHV), Перегонівка (PRG), урочище Слюсаренко (SLS), Копенькувате (KPN), Тарасівка (TRS).

структурі (Польовий стан (PLS), структура Тарасівська (STR), Шевченко (SHV)), ще по два: на заході — Перегонівка (PRG) та

урочище Слюсаренко (SLS), і на сході від неї Копенькувате (KPN) та Тарасівка (TRS). Отримано криві ГМТЗ (амплітудні та фазо-

ві) для діапазону T 10—10000 с і комплексні індукційні параметри для T 20—6900 с.

Кут між частинами комплексного типера є магнітоваріаційним параметром асиметрії, і в разі двовимірної структури вони колінеарні та перпендикулярні до її простягання. Максимум частотної характеристики має діапазон періодів T 500—1200 с, азимут типера залежно від T майже не змінюється і спрямований на північний захід (рис. 2, б). Зі збільшенням періоду $\text{Im}W$ росте та зорієнтований на південний схід, $\text{Re}W$ та $\text{Im}W$ колінеарні. Такий просторовий напрямок на цих періодах T можна пояснювати спільним впливом субмеридіональної регіональної Кіровоградської аномалії та субширотної локальної аномалії електропровідності на межі Ятранського та Голованівського блоків (на глибинах від 10 до 30 км з ρ 250 Ом·м завдовжки понад 100 км) [Ширков и др., 2017].

На періодах від 8 до 11 с типери майже на всіх пунктах спостережень зазнають значного впливу від техногенних перешкод різної природи, незважаючи на процедуру RR (двоточкову), яку передбачає програма обробки електромагнітного поля PRC_MTMV [Варенцов, 2013] (рис. 2, а). Зі збільшенням періоду до 50 с колінеарність $\text{Re}W$ та $\text{Im}W$ порушується, кут між ними сягає 90° , їх величина на більшості пунктів

співмірна та дорівнює 0,1—0,25, основний напрямок $\text{Re}W$ — захід—північний захід. Найменші величини типерів спостерігаються в центральній точці Тарасівської структури (STR), на південному заході (SLS) та сході (TRS). Цей аналіз магнітоваріаційних відгуків свідчить про складну тривимірну характеристику Тарасівської структури у приповерхневій частині розрізу.

На рис. 3 показано криві МТЗ, отримані за результатами тільки одноточкової обробки, двоточкова обробка з референтним пунктом PLS майже не покращила якість передавальних операторів МТ-поля. Практично на всіх пунктах відсутня конформність кривих МТЗ, розбіжність кривих ρ_{Π} за напрямками вимірювальних ліній властива всьому частотному діапазону, збільшується за періодом T і становить 1—3,5 порядку. Частотні залежності ρ_{Π} не відповідають рівню глобальних даних. Усі меридіональні амплітудні криві ρ_{xy} характеризуються висхідними гілками до T 1000—2000 с, де значення ρ_{xy} досягають максимумів понад 10 000 Ом·м (PLS, KPN, TRS) і 1000 Ом·м на інших пунктах. На багатьох широтних амплітудних кривих ρ_{yx} спостерігаються мінімуми на періодах понад 2000 с (PLS, STR, SHV, KPN, TRS), яким відповідає специфічна поведінка фаз імпедансу, особливо у пунктах PLS, SHV, TRS.

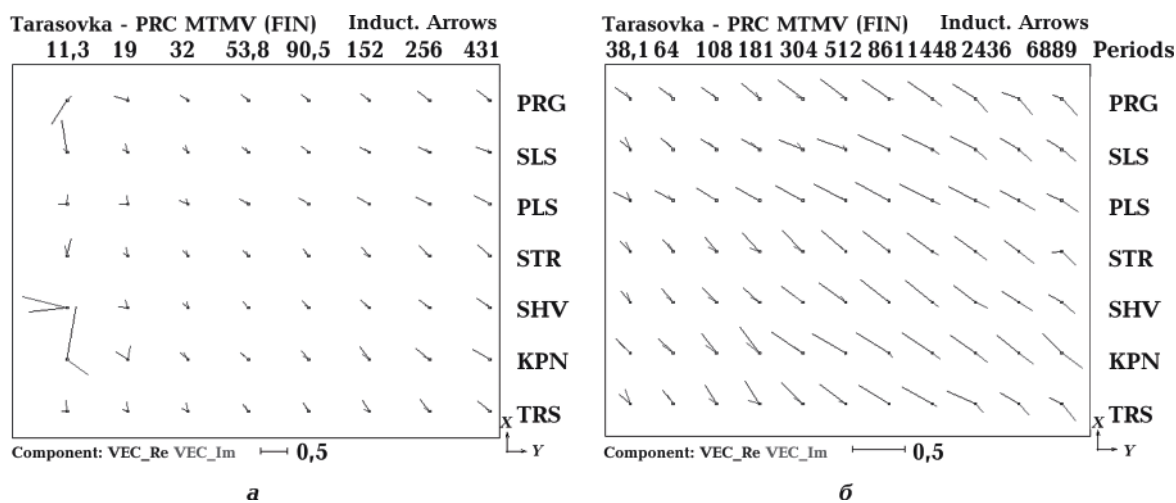


Рис. 2. Комплексні типери по площі Тарасівської структури.

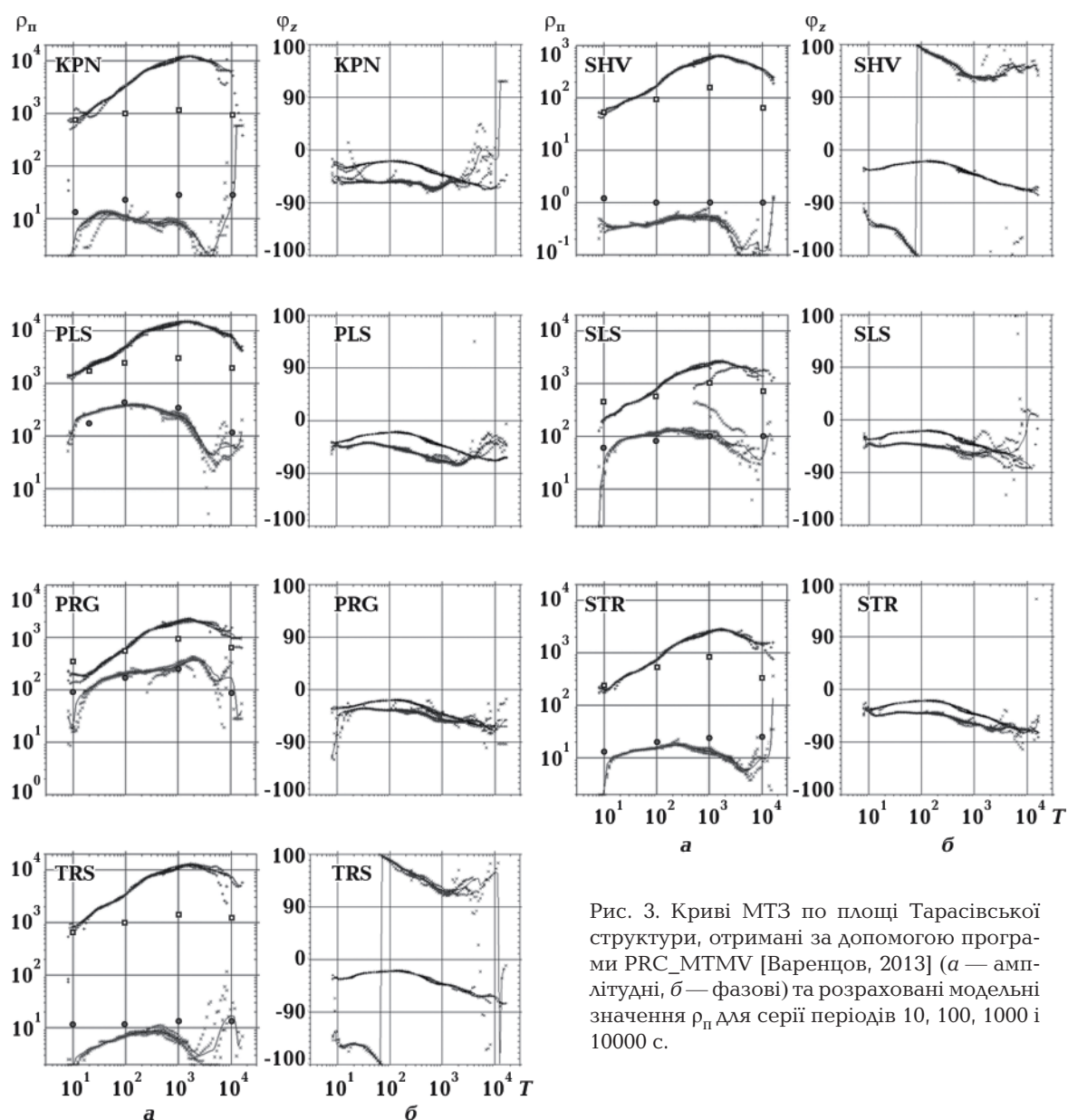


Рис. 3. Криві МТЗ по площі Тарасівської структури, отримані за допомогою програми PRC_MTMV [Варенцов, 2013] (*a* — амплітудні, *б* — фазові) та розраховані модельні значення $\rho_{\text{п}}$ для серії періодів 10, 100, 1000 і 10000 с.

Рівень ρ_{yx} коливається від 5 до 500 Ом·м і дорівнює в середньому 10 Ом·м. Якісна інтерпретація кривих ρ_{yx} припускає наявність на глибинах 100—200 км витягнутої структури з провідністю 2000—4000 См. Проте ці оцінки можуть бути недостовірними, оскільки аномалія проявляється тільки на одній поляризації і на таких частотах, де спостережені електромагнітні поля мають малі значення; крім того, на цих частотах можливий неоднорідний вплив первинного джерела [Шуман, Савин, 2011]. Упевнено можна стверджувати тільки наявність поверхневої локальної аномалії

електропровідності, тому що на це вказує розбіжність кривих $\rho_{\text{п}}$ за напрямками вимірювальних ліній.

Таким чином, згідно з аналізом експериментальних даних, складна тривимірна ситуація в межах Тарасівської структури передбачає наявність поверхневої та, можливо, глибинної електропровідної аномалії. Це і є питання, які має вирішити тривимірне моделювання.

Тривимірне геоелектричне моделювання глибинної будови Тарасівської структури. Якщо об'єктом електромагнітних досліджень є шовна зона, яка відзначається

наявністю не досить потужних, але суттєво неоднорідно розподілених осадових відкладів, існуванням електропровідних приповерхневих розломів та іншими факторами (наприклад, близьким розміщенням регіональних структур високої провідності), необхідно використовувати відповідний інструмент тривимірного моделювання низькочастотних електромагнітних полів. При розрахунках електромагнітного поля був застосований пакет програмного забезпечення Mtd3fwd [Mackie, Booker, 1999].

Методика побудови моделей розподілу глибинної електропровідності потребує виконання вимог щодо розміру комірок та їх кількості, а також урахування впливу на низькочастотне магнітотелуричне поле в локальній зоні не тільки параметрів глибинного «нормального» горизонтально-шарового розрізу, а й регіональних латерально-неоднорідних структур, усередині яких розташовані об'єкти дослідження. Так, локальну Тарасівську структуру змодельовано у регіональній моделі ГШЗ [Ширков и др., 2017].

Центральна частина ГШЗ характеризується низькими значеннями та суттєвою мінливістю сумарної поздовжньої провідності (S) приповерхневого шару — від 5 до 100 См. При моделюванні електромагнітного поля розподіл S першого провідного шару розглядали як апіорну інформацію, для Тарасівської структури було прийнято $S=1$ См.

Регіональну і локальну аномальні зони досліджували на фоні добре відомого для УЩ одновимірного (1D) розрізу, який характеризується такими питомим електричним опором (ρ) і потужністю (H): $\rho_1 = 10$ Ом·м, $H_1 = 2$ км; $\rho_2 = 1000$ Ом·м, $H_2 = 158$ км; $\rho_3 = 600$ Ом·м, $H_3 = 40$ км; $\rho_4 = 250$ Ом·м, $H_4 = 50$ км; $\rho_5 = 100$ Ом·м, $H_5 = 70$ км; $\rho_6 = 50$ Ом·м, $H_6 = 80$ км; $\rho_7 = 20$ Ом·м, $H_7 = 100$ км; $\rho_8 = 10$ Ом·м, $H_8 = 100$ км; $\rho_9 = 5$ Ом·м, $H_9 = 160$ км; $\rho_{10} = 1$ Ом·м, $H_{10} = 200$ км; $\rho_{11} = 0,1$ Ом·м, $H_{11} = \infty$ км.

Для побудови моделі розподілу питомого електричного опору порід Тарасівської структури деталізували зону моделювання

ГШЗ. Горизонтальні розміри комірок у зоні структури було зменшено з 5 до 1 км, відповідно до напрямків горизонтальних осей розташовано комірки (5×5), кожна з яких характеризується однорідним опором ρ . Вертикальні розміри комірок змінювали від 25 (у верхніх) до 40 км (у глибинних шарах), як і для моделі ГШЗ. Планшет моделювання Тарасівської структури за координатами такий: 48°34' пн.ш., 30°28' сх.д.; 48°34' пн.ш., 30°46' сх.д.; 48°28' пн.ш., 30°28' сх.д.; 48°28' пн.ш., 30°46' сх.д. (див. рис. 1, 4).

3D моделювання полягало в реалізації двох етапів: на першому підбирали модель розподілу електропровідності, для якої розраховані магнітоваріаційні параметри мали відповідати експериментальним даним (див. рис. 2); на другому уточнювали підбрану модель за даними ГМТЗ (див. рис. 3).

На першому етапі моделювання було проаналізовано індукційні параметри вже розрахованих моделей ГШЗ у межах Тарасівської структури. Майже на всіх періодах від 100 с значення величин (середнє 0,15—0,3) та орієнтацію на північний захід типерів можна пояснювати спільним впливом субмеридіональної регіональної Кіровоградської аномалії та субширотної локальної аномалії електропровідності на межі Ятранського та Голованівського блоків (на глибинах від 10 до 30 км з $\rho = 250$ Ом·м, довжина понад 100 км) [Ширков и др., 2017]. Тарасівська структура під час модельних розрахунків слабо проявилася на періодах до 100 с, але найменші значення типерів відповідають найбільш електропровідним частинам глибинного розлому, що перетинає структуру у широтному напрямку.

В подальшому, на другому етапі моделювання, використовували сучасні ГМТЗ, виконані у 2017 р. (рис. 3).

У цілому основні кроки моделювання за даними ГМТЗ подібні: задання електропровідності осадового чохла на фоні «нормального» розрізу; введення відомих регіональних аномалій електропровідності; насамкінець, моделювання локальних зон аномально низького або високого питомого опору.

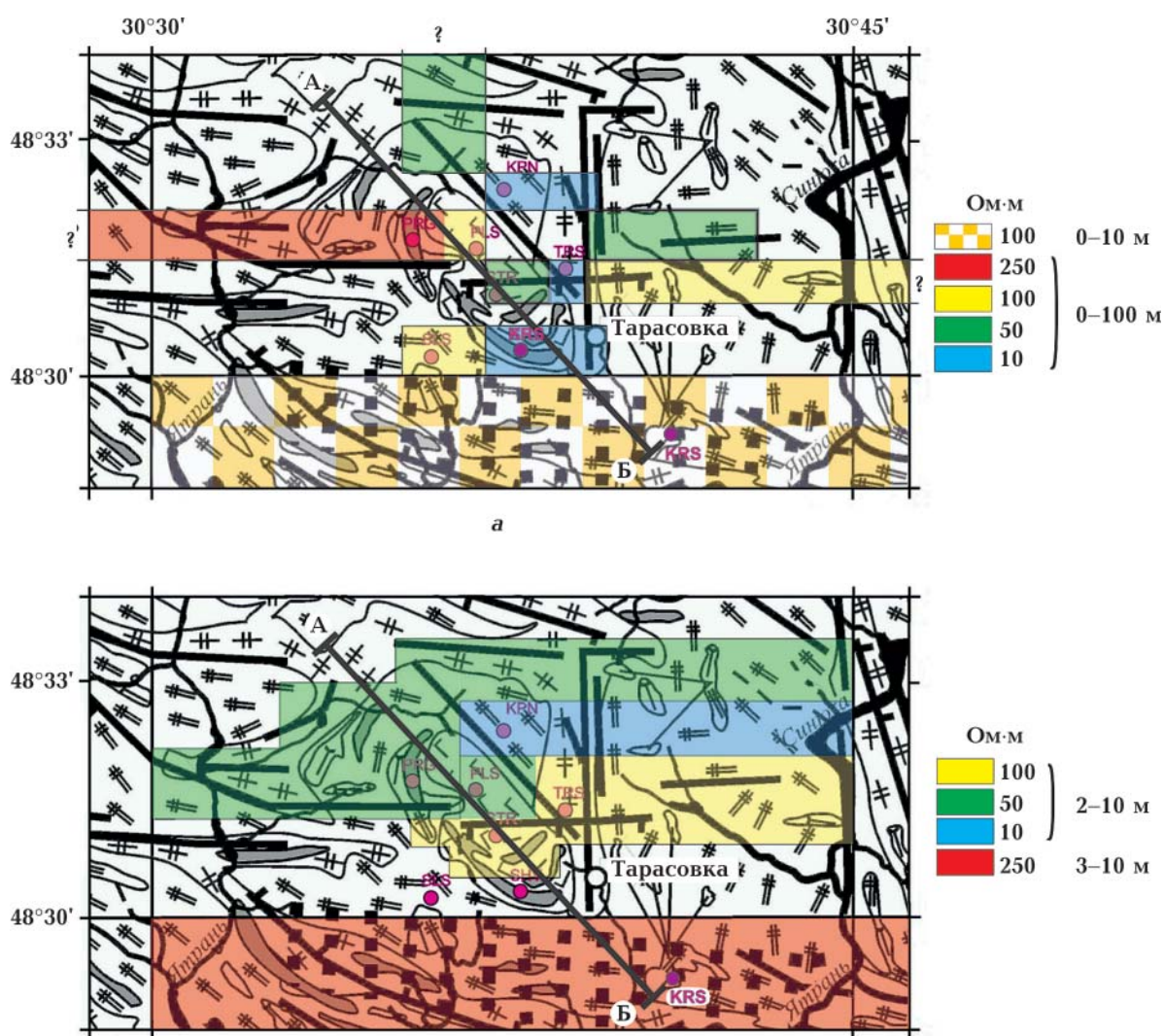


Рис. 4. Аномалії електропровідності за результатами тривимірного моделювання електромагнітного поля на геолого-структурній карті поверхні кристалічного фундаменту ГШЗ за даними [Гинтов и др., 2016]: а — на глибинах до 10—100 м; б — від 2—3 до 10 км.

Низька індивідуальна інтерпретаційна здатність одиничних кривих ГМТЗ унаслідок розташування точок зондувань з різними параметрами (рівнем позірної опору, наявністю чи відсутністю мінімумів на певних періодах, розходженням кривих) завдає значних труднощів при моделюванні. Для їх подолання було порівняно результати розрахунків для серії T 10, 100, 1000 і 10000 с геомагнітних варіацій, які відповідають різним глибинним рівням.

Перший глибинний рівень відповідає періоду варіацій 10 с. Значення позірної опору на цій частоті залежать переважно

від розподілу осадових відкладів, які мають підвищену електропровідність щодо кристалічних порід фундаменту.

Розглянуто декілька варіантів моделей: М1 — поверхневий провідник відповідає геології Тарасівської структури; М2 — за якісною інтерпретацією кривих ГМТЗ.

Аналіз розрахунків М1 не відповідає експериментальним даним, а саме спостерігається зворотна поляризація, криві $\rho_{\text{п}}$ розходяться майже в 2 рази, але не досягають потрібного рівня.

У серію моделей М2 було закладено декілька електропровідних об'єктів за-

хідної—східної та північно-західної—південно-східної орієнтації з поверхні до глибин від 10 м до 2 км з ρ від 1 до 250 Ом·м. Чисельні розрахунки на періоді 10 с дали змогу визнати найкращими такі параметри верхньої частини моделі (див. рис. 3, 4, а). Різниця в розрахунках моделей, за якою обрано оптимальний варіант, становила від 2 до 17 %. Всі об'єкти мають глибину залягання до 100 м; просторові розміри від $1 \times 5 \text{ км}^2$ до $1 \times 13 \text{ км}^2$; ρ від 10 до 250 Ом·м (рис. 4, а, 5).

Розподіл кривих ρ_{Π} такої моделі наблизився до розподілу, спостереженого на $T = 10$ с, співвідношення кривих за поляризацією тут задовільне: субмеридіональні криві знаходяться на рівні від 100 до більш як 1000 Ом·м, а рівень субширотних кривих на порядок і більше менший (див. рис. 3). Проте для $T=100$ с зберігається необхідне співвідношення кривих за поляризаціями, але модельні розрахунки ρ_{Π} у напрямку північ—південь мають тенденцію знижуватися. Тому наступна серія моделей М3 пов'язана з моделюванням зони високого опору. Було відбраковано альтернативні моделі, коли шари високого опору доходили до земної поверхні або коли одновимірний розріз складався тільки з трьох верхніх шарів.

На цьому етапі підібрана модель характеризується підвищенням нормально-го фонового опору з 1000 до 10 000 Ом·м, яким у моделі ГШЗ характеризувались Уманський масив гранітоїдів та Корсунь-Новомиргородський плутон. Також у моделі закладено верхню кромку ізолятора на глибині не 10 км (як у моделі ГШЗ), а 100 м тільки в районі Уманського масиву. Крім того, на глибинах від 10 км Уманський масив і Корсунь-Новомиргородський плутон з'єднано вставкою високого опору 10 000 Ом·м під Ятранським блоком ГШЗ. Така модель дала змогу наблизити розрахунки ρ_{Π} у напрямку північ—південь до спостережених, у деяких пунктах удалося збільшити їх значення майже в 3 рази, при цьому рівень ρ_{Π} у напрямку захід—схід не зазнавав суттєвих змін.

Моделювання субширотної локальної

(відносно ГШЗ) зони високої електропровідності на глибинах від 2—3 до 6—10 км теж сприяло розведенню рівня кривих ρ_{Π} за поляризаціями. Тому в модель М4 було введено аномалію складної форми з $\rho = 10 \div 250$ Ом·м, що має просторові розміри $25 \times 9 \text{ км}^2$ та гальванічно не зв'язана з електропровідними зонами, такими як у моделі ГШЗ: субмеридіональною — Первомайською зоною розломів (на глибинах від 0,1 до 2,5 км з $\rho = 50$ Ом·м), субширотною — на межі Ятранського та Голованівського блоків (на глибинах від 10 до 30 км з $\rho = 250$ Ом·м) та ізометричною у північній частині Голованівського блока (на глибинах від 3 до 10 км з $\rho = 10 \div 250$ Ом·м) [Ширков и др., 2017]. Кінцева модель має аномалію електропровідності на глибині від 2 до 10 км, південна та північна межі якої трасуються вздовж ліній субширотних розломів. Аномалія поділяється на дві зони з різним опором: північно-західну з $\rho = 10 \div 50$ Ом·м та південно-східну з $\rho = 100$ Ом·м (див. рис. 4, б, 5).

Таким чином, розраховані модельні електромагнітні параметри задовольняють експериментальні дані (див. рис. 3, 5): по-перше, зберігається співвідношення кривих ρ_{Π} за поляризаціями; по-друге, розбіжність кривих ρ_{Π} за напрямками вимірювальних ліній характерна для всього частотного діапазону та збільшується з періодом і становить 1—2,5 порядку; по-третє, найбільша неузгодженість спостерігається на великих періодах і може сягати 2—3 разів за абсолютними значеннями; по-четверте, на коротких періодах похибки можуть сягати 20 %.

3D модель. У загальному плані у геологічних межах Тарасівська структура не проявилася у аномальній електропровідності. Однак велика кількість розломних зон, які оконтурюють та перетинають її, виявилися складними аномальними об'єктами як у плані, так і за глибиною (див. рис. 4, 5).

Так, верхні 100 м характеризуються субширотним перемежуванням зон високого (1000 Ом·м) та низького опору (див. рис. 4, а). Найдовша аномальна зона, що перетинає Тарасівську структуру май-

же по центру та просторово збігається з розломом, який виділено за гравімагнітними та геологічними даними, простягається на 25 км і має ширину 1—2 км з $\rho = 50 \div 250$ Ом·м ($\rho = 250$ Ом·м на заході структури, у її межах $\rho = 100 \div 10$ Ом·м, на

схід від неї $\rho = 100$ Ом·м). Найбільш електропровідна аномалія спостерігається на півдні структури, де $\rho = 10$ Ом·м. Аномалія субширотно простягається і за межі структури, де $\rho = 100$ Ом·м. Складна за розподілом $\rho = 10 \div 100$ Ом·м аномалія з різними

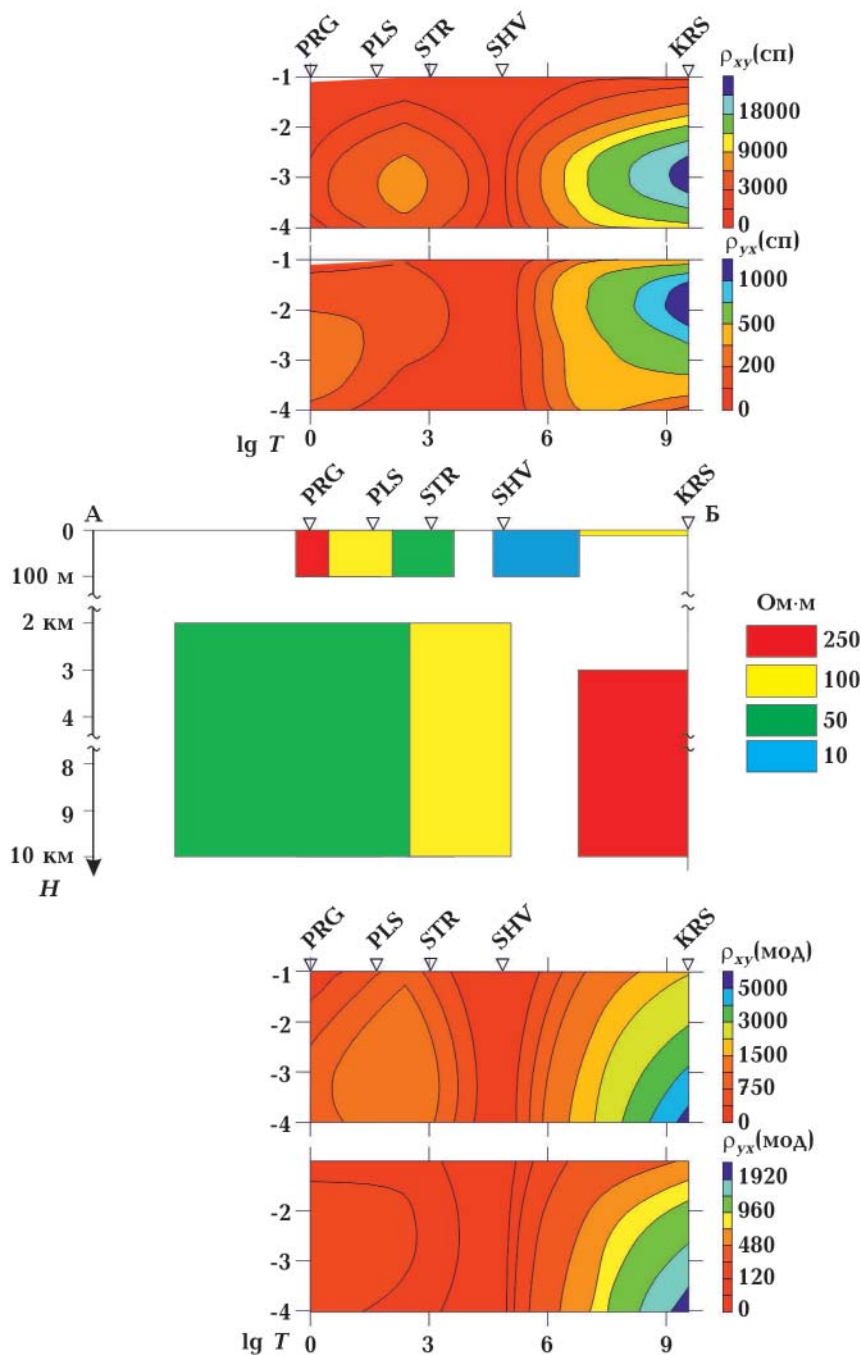


Рис. 5. Розподіл позірного електричного опору (вертикальна шкала T — у логарифмічному масштабі) суб-меридіональної (ρ_{xy}) та субширотної (ρ_{yx}) кривих МТЗ: ρ (сп) — спостережений, ρ (мод) — модельний; аномальний питомий електричний опір 3D моделі Тарасівської структури по профілю А—Б (див. рис. 4).

поперечними розмірами оконтурює Тарасівську структуру з північного сходу. Ця аномалія також частково трасується вздовж розломів різної орієнтації та їх перетинів і має загальний напрямок з північного заходу на південний схід. Нові підібрані електропровідні об'єкти (див. рис. 5) добре узгоджуються з аномальними елементами моделі ГШЗ (на глибинах до 10 м з $\rho = 100$ Ом·м) [Ширков и др., 2017].

Нижче за 100 м вмісне середовище характеризується високим опором — 10 000 Ом·м. В інтервалі глибин від 2 до 10 км поміж ліній субширотних розломів аномалія електропровідності, яка звужується на захід та розширюється на схід, поділяється на дві зони з різним опором: північну з $\rho = 50$ Ом·м та південну з $\rho = 100$ Ом·м (рис. 4, б, 5). Окремим дискусійним елементом цієї моделі на глибинах 2—10 км є субширотно витягнута на відстань близько 13 км зона з $\rho = 10$ Ом·м, яка знаходиться за межею Тарасівської структури на північному сході та просторово залягає під найбільш електропровідним елементом зони розлому, що оконтурює структуру на глибинах до 100 м. Вся аномальна структура гальванічно не зв'язана з глибинною структурою (від 3 до 10 км з $\rho = 250$ Ом·м) у північній частині Голованівського блока ГШЗ.

Висновки. За просторовим розподілом передавальних операторів МТ-поля можна якісно оцінити електропровідність ГШЗ. Так, це наявність яскравих аномалій амплітудних значень ρ_{Π} , що збігаються з глибинними зонами розломів УЩ; Подільською, Тальнівською, Гвоздавською, Владіївською, Первомайською, Ємилівською, між Молдавською та Довгопристанською. За фазовими кривими ці зони виділяються лише фрагментарно.

Основні особливості розподілу типерів відповідають регіональній тектонічній будові і великим геоелектричним неоднорідностям у земній корі ГШЗ, а саме пов'язані з впливом високої провідності осадових відкладів Причорноморської западини і потужної регіональної Кіровоградської аномалії електропровідності.

Якісна характеристика експериментальних даних дає змогу припустити декілька типів орієнтації аномалій електропровідності — субширотну та субмеридіональну, що відповідають поверхневим і глибинним аномаліям електропровідності. Привести до задовільного зіставлення кривих ρ_{Π} (рівень позірною ρ для напрямку південь—північ більший за 1000 Ом·м, а для напрямку схід—захід — 10—100 Ом·м в усьому частотному діапазоні) можна за субширотною орієнтацією у просторі окремих гальванічно зв'язаних об'єктів у верхній частині розрізу: 1) між Лисянським та Ятранськими блоками ГШЗ (профіль Уманський); 2) можливим західним продовженням Суботсько-Мошоринської субширотної зони розломів (профіль Первомайський). Водночас за аналізом експериментальних даних МВП припускаємо наявність субмеридіональних структур підвищеної електропровідності, які відповідають саме розломним зонам ГШЗ — Тальнівській та Первомайській.

На території Тарасівської структури аналіз експериментальних даних засвідчує складну тривимірну ситуацію, яка передбачає наявність поверхневої та, можливо, глибинної електропровідних аномалій. Власне Тарасівська структура фрагментарно проявляється у низькому електричному опорі, її субширотно перетинають електропровідні зони з різною величиною ρ , в яких саме низькі значення від 10 Ом·м на півдні до 100 Ом·м на півночі змодельовано в її контурі. У вертикальному розрізі (рис. 5) цю структуру можна уявити у вигляді кількох шарів: перший — електропровідний з $\rho = 10 \div 250$ Ом·м — з поверхні до глибини 10 м (південніше за $48^{\circ}30'$) і до 100 м (північніше за $48^{\circ}30'$), наймовірніше пов'язаний не тільки з високою електропровідністю поверхневих осадових відкладів, а й із зоною дезінтеграції порід кристалічного фундаменту; другий — високого опору з $\rho = 10\,000$ Ом·м, глибина від 100 м до 2 км, можливо, представлений однорідною недиференційованою товщею апогаброїдів; третій — електропровідний з $\rho = 10 \div 250$ Ом·м — глибина від 2—3 до

10 км, імовірно, можна пояснювати особливим складом порід земної кори на цих глибинах (графітизацією, сульфідизацією та ін.) або флюїдизацією різного похо-

дження. Все частіше за останніми даними природу аномалій розглядають як результат спільного впливу електронного та іонного типів електропровідності.

Список літератури

- Бурахович Т. К., Ганієв О. З., Ширков Б. І. Моделювання глибинної будови Голованівської шовної зони за даними геоелектрики. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2015. № 2. С. 52—59.
- 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.* 2015а. Т. 37. № 6. С. 42—63. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111171>.
- Бурахович Т. К., Шеремет Е. М., Николаев И. Ю., Ширков Б. И. Возможности МТ/МВ исследований для прогнозирования месторождений полезных ископаемых на Украинском щите. *XIV th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, 11—14 May 2015*. Kyiv, 2015б. 4 p. doi: 10.3997/2214-4609.20141235.
- Бурахович Т. К., Ширков Б. І. Глибинні геоелектричні дослідження Голованівської шовної зони. *Геоінформатика*. 2015. № 1(53). С. 61—69.
- Варенцов И. М. Программная система `rgc_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. ИНГГ СО РАН, 2013. С. 1—4.
- Гинтов О. Б., Ентин В. А., Мычак С. В., Павлюк В. Н., Зюльце В. В. Структурно-петрофизическая и тектонофизическая основа геологической карты кристаллического фундамента центральной части Голованевской шовной зоны Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 3—28. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777>.
- Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. Под ред. А. В. Анциферова. Донецк: Вебер, 2008. 305 с.
- Ингерров А. И., Бугримов Л. П., Колдунов А. А., Попов В. М., Рокитянский И. И., Дзюба К. И., Лысенко Е. С., Рокитянская Д. А. Результаты МТЗ на участке Килия—Кривой Рог. В кн.: *Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII*. Киев: Наук. думка, 1988а. С. 145—149.
- Ингерров А. И., Попов В. М., Рокитянский И. И., Лысенко Е. С., Рокитянская Д. А., Шуман В. Н. Геоэлектрический разрез участка Винница—Евпатория. В кн.: *Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII*. Киев: Наук. думка, 1988б. С. 106—111.
- Кулик С. Н., Логвинов И. М., Бурахович Т. К. Геоэлектрические исследования на Украине. В кн.: *Тектоносфера Украины*. Киев: Наук. думка, 1989. С. 58—63.
- Николаев И. Ю., Шеремет Е. М., Бурахович Т. К., Кривдик С. Г., Калашник А. А., Николаев Ю. И., Сетая Л. Д., Агаркова Н. Г. Ингульский мегаблок Украинского щита (глубинная геоэлектрическая модель и полезные ископаемые). Донецк: Ноулидж, 2014. 180 с.
- Ширков Б. І., Бурахович Т. К. Електромагнітні методи при прогнозуванні рудопроявів корисних копалин. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2017. № 4. С. 40—45.
- 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—58. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94010>.
- Шуман В. Н., Савин М. Г. Математические модели геоелектрики. Киев: Наук. думка, 2011. 226 с.

- Birt C. S., Maguire P. K. H., Khan M. A., Thybo H., Keller R. K., Patel J., 1997. The influence of preexisting structures on the evolution of the southern Kenya Rift Valley: Evidence from seismic and gravity studies. *Tectonophysics* 278(1-4), 211—242.
- Brasse H., Lezaeta P., Rath V., Schwabner K., Soyer W., Haak V., 2002. The Bolivian Altiplano conductivity anomaly. *J. Geophys. Res.* 107(B5), EPM 4-1—EPM 4-14. doi: 10.1029/2001JB000391.
- Burakhovich T. K., Shyrkov B. I., 2012. Three-dimensional geoelectric model of the Earth's crust of Kirovograd ore region of the Ukrainian Shield. *Тез. докл. XI Міжнарод. конф. «Геоінформатика: теоретическіе і прикладніе аспекти», 14—17 мая 2012 г.* Київ: ВАГ, 2012. С. 25—53. CD-ROM.
- Fon L. T., 2011. Magnetotellurics and Geomagnetic Depth Sounding in Queensland, South Eastern Australia — Evidence for the Tasman Line? Doctoral thesis. <http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-0006-B538-D>.
- Ingerov A. I., Rokityansky I. I., Tregubenko V. I., 1999. Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space* 51, 1127—1133. <https://doi.org/10.1186/BF03351586>.
- Jones A. G., Snyder D., Spratt J., 2001. Magnetotelluric and teleseismic experiments as part of the Walmsley Lake project, Northwest Territories experimental designs and preliminary result. *Geol. Surv. Can. Curr. Res. C* 6, 1—10.
- Khoza T. D., Jones A. G., Muller M. R., Evans R. L., Miensopust M. P., Webb S. J., 2013a. 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. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 118(8), 4378—4397. doi:10.1002/jgrb.50258.
- Khoza T. D., Jones A. G., Muller M. R., Evans R. L., Webb S. J., Miensopust M., the SAMTEX team, 2013b. Tectonic model of the Limpopo belt: Constraints from magnetotelluric data. *Precambrian Res.* 226, 143—156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.11.016>.
- Lilley F. E. M., Wang L. J., Chamalaun F. H., Ferguson I. J., 2001. The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate. *GSAA Monograph* 201, 1—16.
- Mackie R. L., Booker J., 1999. Documentation for mtd3fwd and d3-to-mt. GSY-USA Inc., 2261 Market St., Suite 643, San Francisco, CA 94114.
- Spratt J. E., Jones A. G., Jackson V. A., Collins L., Avdeeva A., 2009. Lithospheric geometry of the Wopmay orogen from Slave craton to Bear Province magnetotelluric transect. *J. Geophys. Res.* 114, B0110. doi:10.1029/2007JB005326.
- Wannamaker P., 2005. Anisotropy versus heterogeneity in continental solid Earth electromagnetic studies: fundamental response characteristics and implications for physicochemical state. *Surv. Geophys.* 26(6), 733—765. doi: 10.1007/s10712-005-1832-1.
- Wannamaker P., Jiracek G. R., Stodt J. A., Caldwell T. G., Gonzalez V. M., McKnight J. D., Porter A. D., 2001. Fluid generation and movement beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.* 107, B6. doi: 10.1029/2001JB000186.

Three-dimensional deep geoelectric model of the Tarasivka structure of the Golovanivsk suture zone

© T. K. Burakhovich, V. A. Ilyenko, A. M. Kushnir, B. I. Shirkov, 2018

In 2017 the field simultaneous areal measurements of the external low-frequency natural electromagnetic field of the Earth and the construction of a three-dimensional deep resistivity distribution in the crust of the Tarasivka structure (48032' N, 30037' E) were performed in the central part of the Yatran Block of the Golovanivsk suture zone. The analysis of experimental data (the curves of deep magnetotelluric sounding for a period

of 10—10000 s and the complex induction parameters for periods of 20—6900 s) indicates a complex three-dimensional situation, which involves the presence of a nearsurface and possibly deep conductivity anomalies. According to the results of three-dimensional modeling, the Tarasivka structure is fragmentarily manifested as a low resistivity, the conductive zones with different resistivity cross it in a sublatitudinal direction, in which the lowest values from 10 Ohm·m in the south to 100 Ohm·m in the north are in its contour. In the vertical section it can be represented in as several layers: the first one is the conductor with $\rho=10\div 250$ Ohm·m — from the surface to 10 m (south of 48030¢) to 100 m (north of 48030¢), most likely linked not only with high electrical conductivity of surface sediment deposits, but also with the zones of disintegration of rocks of the basement; the second one is a high resistivity layer with $\rho=10000$ Ohm·m — from 100 m to 2 km, possibly it is represented by the uniform non-differentiated thickness; the third layer is the electrical conductor with $\rho=10\div 250$ Ohm·m from 2—3 km to 10 km, probably linked with the special composition of the earth's crust at these depths (graphitization, sulfidization, etc.) or fluidization of different origins, more often it is considered according to the modern data that the nature of the conductive anomalies is the result of the joint influence of the electron and ion types of electrical conductivity.

Key words: Golovanivsky suture zone, 3D geoelectric model, MT/MV methods, electrical conductivity anomalies.

References

- Burakhovych T. K., Haniyev O. Z., Shyrkov B. I., 2015. Modeling of the deep structure of Golovan's seam zone according to geoelectric data. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universitetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya* (2), 52—59 (in Ukrainian).
- Burakhovich T. K., Nikolayev I. Yu., Sheremet Ye. M., Shirkov B. I., 2015a. Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral deposits. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(6), 42—63 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111171>.
- Burakhovich T. K., Sheremet Ye. M., Nikolaev I. Yu., Shirkov B. I., 2015a. Possibilities of MT/MB studies for forecasting mineral deposits on the Ukrainian Shield. *XIV th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects, 11—14 May 2015*. Kyiv, 2015b. 4 p. (in Russian). doi: [10.3997/2214-4609.20141235](https://doi.org/10.3997/2214-4609.20141235).
- Burachovich T. K., Shyrkov B. I., 2015. Depth geoelectric study of the Golovanivsk suture zone. *Geoinformatika* (1), 61—69 (in Ukrainian).
- Varentsov I. M., 2013. Software system prc_mtmv for data processing of synchronous MT/MV probing. Materials of the VI All-Russian School of Seminar on EM Sounding on behalf of M. N. Berdichevskiy and L. L. Vanyan. Novosibirsk: INGG SB RAS, P. 1—4 (in Russian).
- Gintov O. B., Entin V. A., Mychak S. V., Pavlyuk V. N., Zyultsle V. V., 2016. Structural-petrophysical and tectonophysical base of geological map of crystalline basement of the central part of Golovanivsk suture zone of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(3), 3—28 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777>.
- Geological and geophysical model of the Golovanivsk suture zone of the Ukrainian shield. Ed. A. V. Antsiferov. Donetsk: Veber, 2008. 305 p. (in Russian).
- Ingerov A. I., Bugrimov L. P., Koldunov A. A., Popov V. M., Rokityanskiy I. I., Dzyuba K. I., Lysenko E. S., Rokityanskaya D. A., 1988a. The MTZ results for site of Kiliya—Krivoy Rog. In: *Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotraverses IV, VI, VIII*. Kiev: Naukova Dumka, P. 145—149 (in Russian).
- Ingerov A. I., Popov V. M., Rokityanskiy I. I., Lysenko E. S., Rokityanskaya D. A., Shuman V. N., 1988b. Geoelectric section of the Vinnytsia-Evpatoria plot. In: *Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotraverses IV, VI, VIII*. Kiev: Naukova Dumka, P. 106—111 (in Russian).
- Kulik S. N., Logvinov I. M., Burakhovich T. K., 1989. Geoelectric researches in Ukraine. In: *Tectonosphere of Ukraine*. Kiev: The Naukova Dumka, P. 58—63 (in Russian).

- Nikolaev I. Yu., Sheremet Ye. M., Burakhovich T. K., Krivdik S. G., Kalashnik A. A., Nikolaev Yu. I., Setaya L. D., Agarkova N. G., 2014. The Ingulsky megablock of the Ukrainian shield (deep geoelectric model and minerals). Donetsk: Noulidzh, 180 c. (in Russian).
- Shyrkov B. I., Burachovich T. K., 2017. Electromagnetic methods at prediction of mineral manifestations of minerals. *Visnyk Kyyivskoho natsionalnoho universtetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiya* (4), 52—59 (in Ukrainian). С. 40—45.
- Shirkov 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—58 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94010>.
- Shuman V. N., Savin M. G., 2011. Mathematical models of geoelectrics. Kiev: Naukova Dumka, 226 p. (in Russian).
- Birt C. S., Maguire P. K. H., Khan M. A., Thybo H., Keller R. K., Patel J., 1997. The influence of preexisting structures on the evolution of the southern Kenya Rift Valley: Evidence from seismic and gravity studies. *Tectonophysics* 278(1-4), 211—242.
- Brasse H., Lezaeta P., Rath V., Schwalnberg K., Soyler W., Haak V., 2002. The Bolivian Altiplano conductivity anomaly. *J. Geophys. Res.* 107(B5), EPM 4-1—EPM 4-14. doi: 10.1029/2001JB000391.
- Burakhovych T. K., Shyrkov B. I., 2012. Three-dimensional geoelectric model of the Earth's crust of Kirovograd ore region of the Ukrainian Shield. *Тез. докл. XI Междунар. конф. «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты», 14—17 мая 2012 г.* Киев: ВАГ, 2012. С. 25—53. CD-ROM.
- Fon L. T., 2011. Magnetotellurics and Geomagnetic Depth Sounding in Queensland, South Eastern Australia — Evidence for the Tasman Line? Doctoral thesis. <http://hdl.handle.net/11858/00-1735-0000-0006-B538-D>.
- Ingerov A. I., Rokityansky I. I., Tregubenko V. I., 1999. Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space* 51, 1127—1133. <https://doi.org/10.1186/BF03351586>.
- Jones A. G., Snyder D., Spratt J., 2001. Magnetotelluric and teleseismic experiments as part of the Walmsley Lake project, Northwest Territories experimental designs and preliminary result. *Geol. Surv. Can. Curr. Res. C 6*, 1—10.
- Khoza T. D., Jones A. G., Muller M. R., Evans R. L., Miensopust M. P., Webb S. J., 2013a. 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. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 118(8), 4378—4397. doi:10.1002/jgrb.50258.
- Khoza T. D., Jones A. G., Muller M. R., Evans R. L., Webb S. J., Miensopust M., the SAMTEX team, 2013b. Tectonic model of the Limpopo belt: Constraints from magnetotelluric data. *Precambrian Res.* 226, 143—156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2012.11.016>.
- Lilley F. E. M., Wang L. J., Chamalaun F. H., Ferguson I. J., 2001. The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate. *GSAA Monograph* 201, 1—16.
- Mackie R. L., Booker J., 1999. Documentation for mtd3fwd and d3-to-mt. GSY-USA Inc., 2261 Market St., Suite 643, San Francisco, CA 94114.
- Spratt J. E., Jones A. G., Jackson V. A., Collins L., Avdeeva A., 2009. Lithospheric geometry of the Wopmay orogen from Slave craton to Bear Province magnetotelluric transect. *J. Geophys. Res.* 114, B0110. doi:10.1029/2007JB005326.
- Wannamaker P., 2005. Anisotropy versus heterogeneity in continental solid Earth electromagnetic studies: fundamental response characteristics and implications for physicochemical state. *Surv. Geophys.* 26(6), 733—765. doi: 10.1007/s10712-005-1832-1.
- Wannamaker P., Jiracek G. R., Stodt J. A., Caldwell T. G., Gonzalez V. M., McKnight J. D., Porter A. D., 2001. Fluid generation and movement beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.* 107, B6. doi: 10.1029/2001JB000186.