

## Глибинні геоелектричні дослідження Троянківського та Тарасівського метабазитових масивів Голованівської шовної зони

*А. М. Кушнір<sup>1</sup>, Т. К. Бурахович<sup>1</sup>, В. А. Ільєнко<sup>1</sup>, Б. І. Ширков<sup>1</sup>,  
І. Ю. Ніколаєв<sup>2</sup>, 2019*

<sup>1</sup>Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. Н. П. Семененко НАН України,  
Київ, Україна

Надійшла 5 жовтня 2019 р.

Приведены результаты экспериментальных наблюдений низкочастотного естественного переменного электромагнитного поля Земли внешнего ионосферно-магнитосферного происхождения, проведенных в 2017—2018 гг., на территории Ятраньского блока Голованевской шовной зоны Украинского щита. После применения процедур синхронной оценки передаточных операторов МТ/МВ полей с помощью программного комплекса PRC-MTMV получены комплексные индукционные параметры для периодов от 50 до 4000 с и амплитудные кривые кажущегося удельного сопротивления и фаз импеданса для широкого диапазона периодов от 10 до 10 000 с. Качественный анализ экспериментальных параметров показал, что Троянковская и Тарасовская структуры характеризуются очень сложным строением в геоэлектрическом аспекте. С одной стороны, это наличие поверхностной локальной трехмерности, на что указывает значительное расхождение кривых  $\rho_{\text{п}}$  в подавляющем большинстве пунктов наблюдений. С другой стороны, это резкое изменение течения теллурических токов в восточной части планшета и влияние расположенных на юго-западе хорошо проводящих Емилевского и Краснополянского разломов. Построенные с применением программного обеспечения Mtd3fwd трехмерные геоэлектрические модели Тарасовской и Троянковской структур существенно различаются. Если в первой четко можно выделить поверхностный, до 100 м, и глубинный, 2—10 км, слои, причем последний несет существенную нагрузку и некоторые блоки пространственно совпадают, то во второй кроме хорошо развитого поверхностного, до 100 м, слоя существует несколько локальных зон на разных глубинных уровнях, но только до верхних 4 км, чередующихся со слоями высокого сопротивления. Представляет интерес наличие на юге в обеих моделях (или между ними) субширотных глубинных проводников 4÷7—10 км, которые пространственно совпадают с геолого-геофизическими структурами. И хотя геологические границы структур полностью не отразились в аномальной электропроводимости, объединяет модели фрагментарное проявление низких значений  $\rho$  от 5 до 100 Ом·м именно в теле метабазитовых массивов. Впрочем уверенно можно говорить о высокой электропроводимости разломов разного ранга и их пересечений. Высокую электропроводимость можно объяснить особым составом пород земной коры (графитизацией, сульфидизацией и др.) или флюидизацией разного происхождения.

**Ключевые слова:** Голованевская шовная зона, 3D геоэлектрическая модель, магнитотеллурическое зондирование, магнитовариационное профилирование, глубинное строение, аномалии электропроводимости.

**Вступ.** В історії консолідації літосфери Східноєвропейської платформи (СЄП) виділяють кілька великих подій [Кировоградский..., 2013], серед яких об'єднання

західної і східної частин Українського щита (УЩ) у єдину структуру у період 2,5—2,6 млрд років тому [Гинтов, Пашкевич, 2010] і колізія літосферних плит Сарматії і Фенноскандії близько 1,7—1,8 млрд років тому. Фактично ці події стали фінальними у формуванні Голованівської шовної зони (ГШЗ) і більшої частини УЩ у цілому як структури з докембрійським фундаментом.

ГШЗ у вигляді субмеридіональної структури, різко розширеної на півдні, чітко виділяється у гравітаційному та магнітному полях, а на геотраверсах ГСЗ — підвищеною потужністю земної кори та складною будовою поверхні М, зумовленою наявністю тут коромантійної суміші [Очерки..., 2018].

У геологічному відношенні до ГШЗ приурочені такі досить специфічні утворення, як карбонатно-залізисто-кременисто-метабазитова формація бузької серії, чарнокіти ятранського типу, основні та ультраосновні породи капітанського та дерюхінського комплексів [Геолого-геофизическая модель..., 2008]. У тектонічному відношенні — це велика і складна зона зсувної будови, яка поєднує різною мірою тектонізовані (до меланжу) метаморфіти, що складають блоки різних порядків. Розглядають їх підкидонасупні тектонічні шви переважно лістричного типу, які віялоподібно розходяться на південь.

Геологічна будова ГШЗ та її електропровідність [Ширков и др., 2017; Ширков, Бурахович, 2017] підтверджують колізійну модель формування кори центральної частини УЩ. На базі створення геолого-геофізичних моделей, побудова яких для докембрію УЩ ґрунтується на теорії тектоніки плит [Геолого-геофизическая модель..., 2008], ГШЗ визначено як загальний з Криворізько-Кременчуцькою структурою колізійний шов (перший етап розвитку — 2,8—0,2,6 млрд років тому), пізніше зруйнований у результаті розсуву та формування задугового басейну (бузька та інгуло-інгулецька серії) і заново сформований одночасно із сучасною Криворізько-Кременчуцькою смугою по краях Кіровоградського орогена (2,1—2,0 млрд років тому — другий етап роз-

витку). За результатами геодинамічних побудов О. Б. Гінтова [Очерки..., 2018] у період  $AR_3$  —  $PR_1$  II у регіоні переважав режим транспресії, який змінювався режимом транстенсії (розтягу) на відрізках 2,6—2,4, 2,1—1,95, 1,8—1,7 млрд років тому. Етапи розтягу пов'язані з нагромадженням первинно-осадово-вулканогенних порід, надходженням флюїдів із глибоких шарів Землі, широким поширенням процесів метасоматичного перетворення порід і графітизацією. На ці проміжки часу припадає утворення більшості високоелектропровідних зон розломів: Ємилівської, Гвоздавської, Врадіївської, Первомайської і Звенигородсько-Братської.

Втім для гірських порід ГШЗ характерні не тільки лінійні структурно-текстурні особливості, які в основному формуються в зонах стиснення та зсуву. В публікації [Гинтов и др., 2016] за даними фізичного моделювання та польовими тектонофізичними спостереженнями розглянуто три основні генетичні типи ізометрично-овальних структур ГШЗ, що утворилися в умовах сильного стиснення та зсуву. Саме до таких базит-метабазитових структур Ятранського блока належать Тарасівський і Троянський масиви, до яких виник інтерес у зв'язку з геолого-пошуковими роботами на апатит-ільменітові та апатитові руди [Гинтов и др., 2018].

Головні джерела рудної речовини в шовних зонах можуть мати мантійне, асиміляційне й інфільтраційне походження [Смирнов, 1971]; крім того, металогенічна зональність цих структур [Нечаєв, Наумов, 1998] вказує на зародження і генетичний зв'язок рудоутворення з геодинамічними літосферними процесами [Старостенко и др., 2011]. Постачання рудних компонентів у складі мантійних флюїдів при утворенні родовищ [Николаєв и др., 2014] нерозривно пов'язане з вертикальними і субвертикальними зонами руйнування гірських порід, які проявляються як зони ослаблення, розущільнення, напруження й тріщинуватості. Такі зони мають особливі, найчастіше досить контрастні геофізичні властивості, в тому числі геоелектричні. У будь-

якому разі вони пов'язані з ендегенними процесами, які проходять або відбувалися в геологічній історії розвитку шовних зон на великих глибинах і викликають підвищення питомої електричної провідності гірських порід.

Таким чином, аномалії питомої електропровідності ( $\sigma$ ) є одним з головних факторів, що визначають можливу зону результату прояву докембрійських геодинамічних процесів, яка ускладнюється інтрузивним магматизмом, і тому мають бути досліджені з позиції формування і розміщення родовищ корисних копалин.

У цій статті викладено матеріали експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі іоносферно-магнітосферного походження на Троянківському та Тарасівському метабазитових масивах. Запропоновано аналіз та інтерпретацію результатів побудови та розрахунку детальної тривимірної глибинної моделі розподілу питомого електричного опору ( $\rho$ ) в земній корі Ятранського блока ГШЗ. Стаття є продовженням та деталізуванням уявлення про неоднорідний розподіл величини  $\rho$  Тарасівської структури (48°32' пн. ш., 30°37' сх. д.) ГШЗ [Бурахович і др., 2018]. За розрахунками тривимірної моделі остання в геологічних межах не проявилася у аномальній величині  $\sigma$ . Втім велика кількість розломних зон, які оконтурюють та перетинають зону, виявилися складними аномальними об'єктами як у плані, так і за глибиною. У приповерхнево-му шарі мозаїчно субшироко розташовані аномальні ( $10 \leq \rho \leq 100$  Ом·м) та «нормальні» ( $\rho = 1000$  Ом·м) зони. У вертикальному розрізі її можна зобразити у вигляді кількох шарів: перший — електропровідний з  $\rho = 10\text{—}250$  Ом·м — з поверхні до глибини 10 (південніше за 48°30') — 100 м (північніше за 48°30'); другий — високого опору,  $\rho = 10000$  Ом·м, глибини від 100 м до 2 км, імовірно, складений однорідною недиференційованою товщею; третій — електропровідний,  $\rho = 10\text{—}250$  Ом·м, глибина від 2—3 до 10 км, що можна пояснювати особливим складом порід земної кори на цих глибинах (графітизацією, сульфідизацією

та ін.) або флюїдизацією різного походження. Все частіше за останніми даними природу аномалій розглядають як результат спільної дії електронного та іонного типів величини  $\sigma$ .

**Сучасні електромагнітні дослідження Троянківської структури ГШЗ.** Останній огляд сучасних експериментальних магнітотелуричних та магнітоваріаційних (МТ/МВ) досліджень ГШЗ подано у публікації [Бурахович та ін., 2018]. Загалом, вони підтверджують наявність вузьких зон високої електропровідності, що просторово збігаються із зонами розломів: Тальнівською, поміж Молдовською та Довгопристанською, Первомайською та Ємилівською (Краснополянською), яка виходить на Троянківську структуру, однотипну з Тарасівською [Бурахович та ін., 2018].

Сучасні синхронні електромагнітні спостереження ГШЗ у 2018 р. проведено за допомогою довгоперіодних цифрових станцій серії LEMI-417 [Пристай і др., 2014]. У переважній більшості пунктів спостережень отримано кондиційні 5-компонентні записи електромагнітного поля, синхронні з ще однією польовою точкою. Загальна кількість пунктів вимірювань із синхронним записом — 10, середня відстань між пунктами вимірювань — від 1,0—2,5 до 4—6 км. У межах Троянківської структури розташовані п'ять пунктів спостережень (Лебединка (LBD), Тріангуляційний пункт (TRG), Троянка (TRO), Мисливські угіддя (MSL), Сап (SAR)), ще п'ять — за її межами на півночі (Цурупи (CRP), Яр (YAR), Кам'яний Міст (КММ)) на відстані 1,0—2,5 км і на півдні поблизу сіл Наливайка (NLV) та Журавлінка (ZRV) на відстані 1,5 км (рис. 1). Матеріали такого рівня задовольняють вимоги до застосування процедур синхронного оцінювання передавальних операторів МТ/МВ полів програмного комплексу PRC-MTMV [Варенцов, 2016; Varentsov, 2015]. Отримано комплексні індукційні параметри для періодів ( $T$ ) від <50 до >4000 с (рис. 2) та амплітудні криві позірною питомого опору ( $\rho_{\text{п}}$ ) і фаз імпедансу ( $\varphi$ ) для широкого діапазону  $T$  від 10 до 10 000 с (рис. 3).

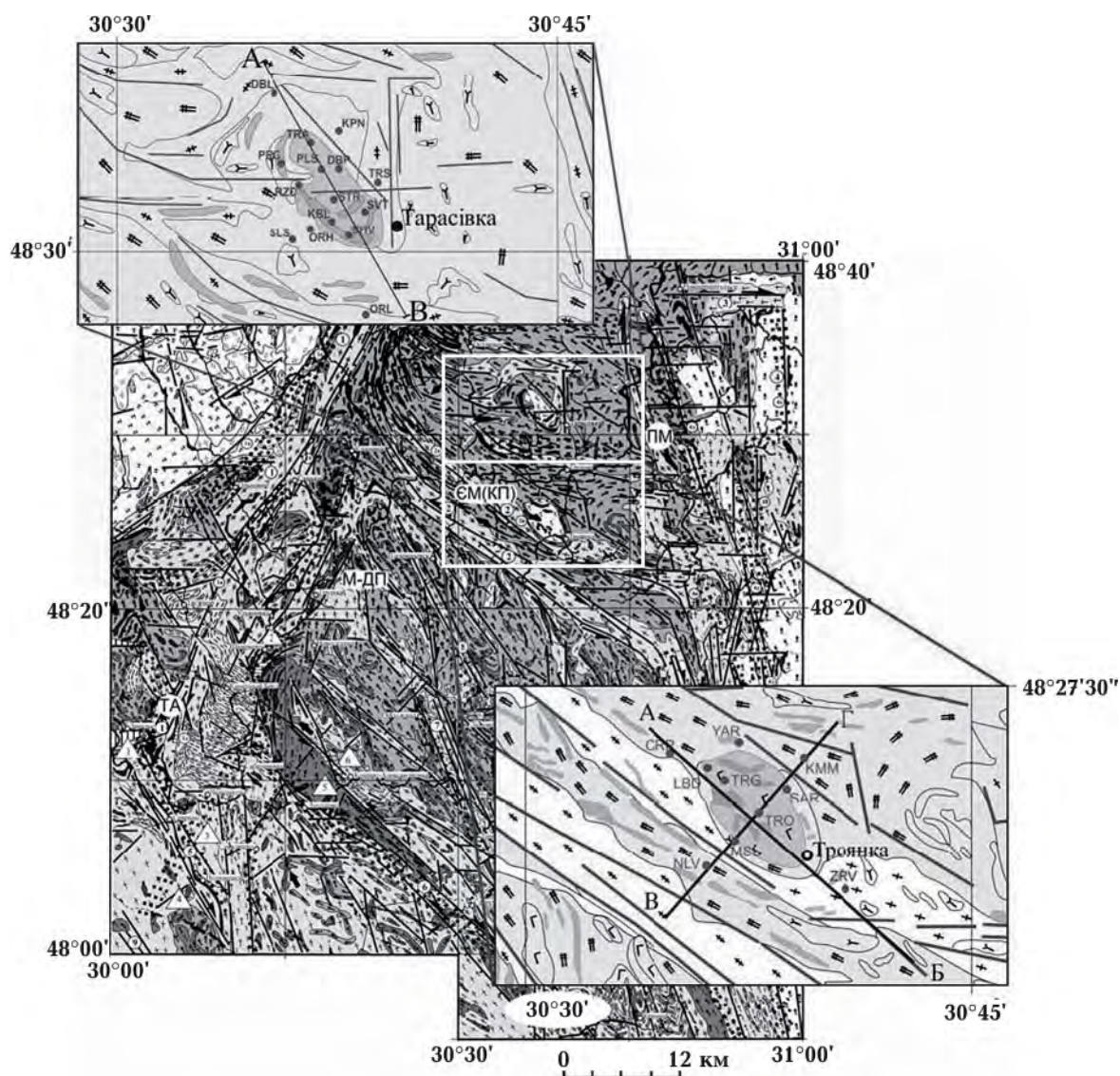


Рис. 1. Контури районів 3D геоелектричних моделей і пункти спостережень МТЗ і МВП Тарасівської (верхня вставка) та Троянківської структур (нижня вставка) на геолого-структурній карті поверхні кристалічного фундаменту центральної частини ГШЗ [Гинтов и др., 2016]. Зони розломів: ТА — Тальнівська, М-ДП — поміж Молдовською та Довгопристанською, ЄМ(КП) — Ємилівська (Краснополянська), ПМ — Первомайська. На верхній вставці — пункти спостережень МТЗ і МВП Тарасівської структури: 2017 р. — Польовий стан (PLS), Тарасівська (STR), Шевченко (SHV), Перегонівка (PRG), урочище Слесаренка (SLS), Копенькувате (KPN), Тарасівка (TRS); 2018 р. — Траса (TRS), Роздоріжжя (RZD), Дубова посадка (DBP), Козине болото (KBL), Святе джерело (SVT), Дубовий ліс (DBL), Орлове (OPL), Горіховий сад (ORN); АВ — лінія інтерпретаційного профілю. На нижній вставці — пункти спостережень МТЗ і МВП Троянської структури: 2018 р. — (CRP), (YAR), (LBD), (TRG), (KMM), (SAR), (TRO), (MSL), (NLV), (ZRV); АВ та БГ — лінії інтерпретаційних профілів.

Максимум частотної характеристики має діапазон 500—1400 с, азимут типера залежно від періоду  $T$  змінюється від північно-західного до північно-східного (рис. 2). Зі збільшенням періоду  $T$  ImW також збільшується й спрямовується на

південний схід, ReW та ImW колінеарні. Такий просторовий напрямок на цих періодах, як і у попередньому випадку (планшет Тарасівської структури [Бурахович та ін., 2018]), можна пояснити сумісним впливом субмеридіональної регіональної

Кіровоградської аномалії та субширотної локальної аномалії на межі Ятранського та Голованівського блоків.

На періоді  $T$  від 30 до 300 с колінеарність  $ReW$  та  $ImW$  відсутня, кут між ними сягає  $90^\circ$ , їх величини на більшості пунктів сумірні. На  $T=300$  с дійсна частина індукційної стрілки (величною  $0,1—0,35$ ) майже в 2 рази перевищує значення  $ImW$ , її основний напрямок — північний захід, крім пунктів SAR, KMM, ZRV, NLV, де вона спрямована на північний схід—північ. Найменші величини типерів спостерігаються на південній окраїні Троянківської структури на межі з добре провідними Ємилівським та Краснополянським розломами у пунктах CRP, LBD, TRG, MSL, ZRV та північно-східному пункті KMM.

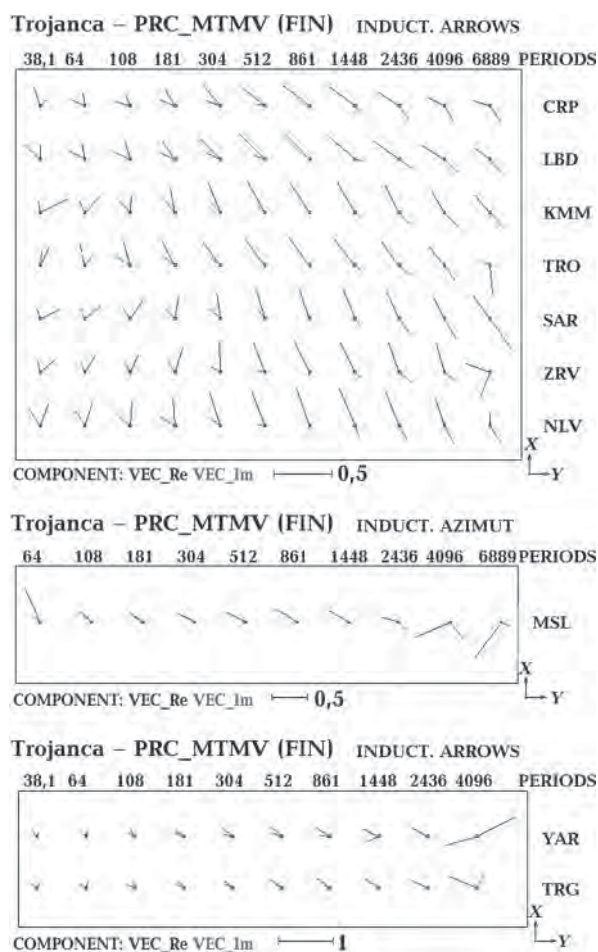


Рис. 2. Комплексні типери на площі Троянківської структури, отримані за допомогою програми PRC\_MTMV [Варенцов, 2016, Varentsov, 2015].

Цей аналіз магнітоваріаційних відгуків засвідчує складну тривимірну характеристику Троянківського метабазитового масиву у приповерхневій частині розрізу, що з півдня ускладнюється субширотними добре провідними Ємилівським і Краснополянським розломами [Ширков и др., 2017] та можливою зміною струмової структури у серії розломів, що облямовують масив, на північно-східному напрямку.

На періодах  $T > 1500$  с спостерігається зменшення  $ReW$  та збільшення  $ImW$ , кут між ними становить більш як  $90^\circ$  до  $180^\circ$ . Індукційні параметри Троянківської площі зазнають меншого техногенного впливу, ніж такі параметри Тарасівської площі. Основні спотворення проявляються на періодах від 4 000 с.

Практично на всіх пунктах спостерігається відсутність конформності кривих МТЗ, розбіжність кривих  $\rho_{II}$  за напрямками вимірювальних ліній характерна для всього частотного діапазону, збільшується з періодом і становить 1—2,5 порядку (рис. 3). Частотні залежності  $\rho_{II}$  не відповідають рівню глобальних даних, виняток становить лише пункт КММ. Меридіональні амплітудні криві  $\rho_{xy}$  характеризуються висхідними гілками до  $T=1000\div 2000$  с, де сягають максимумів 1000—3000 Ом·м, крім пунктів TRO та LBD, у яких значення  $\rho_{xy}$  відповідають 100—200 Ом·м.

У пунктах CRP, LBD, KMM, MSL, TRO на періоді понад 2000 с широтні амплітудні криві  $\rho_{yx}$  мінімальні. Їх якісна інтерпретація вказує на можливу наявність глибинного провідника, як і у Тарасівській структурі. Рівень кривих  $\rho_{yx}$  здебільшого коливається від 1 до 100 Ом·м (у середньому 10 Ом·м). Особливою поведінкою характеризуються пункти KMM та ZRV, де різко змінюється поляризація кривих  $\rho_{II}$  — для кривих KMM до періодів 300 с, ZRV — в усьому частотному діапазоні. Таку поведінку можна пояснити зміною течії телуричних струмів у серії, що облямовує розломи на північно-східному напрямку (пункт KMM), та зміною простягання добре провідних Ємилівського та Краснополянського розломів (пункт ZRV).

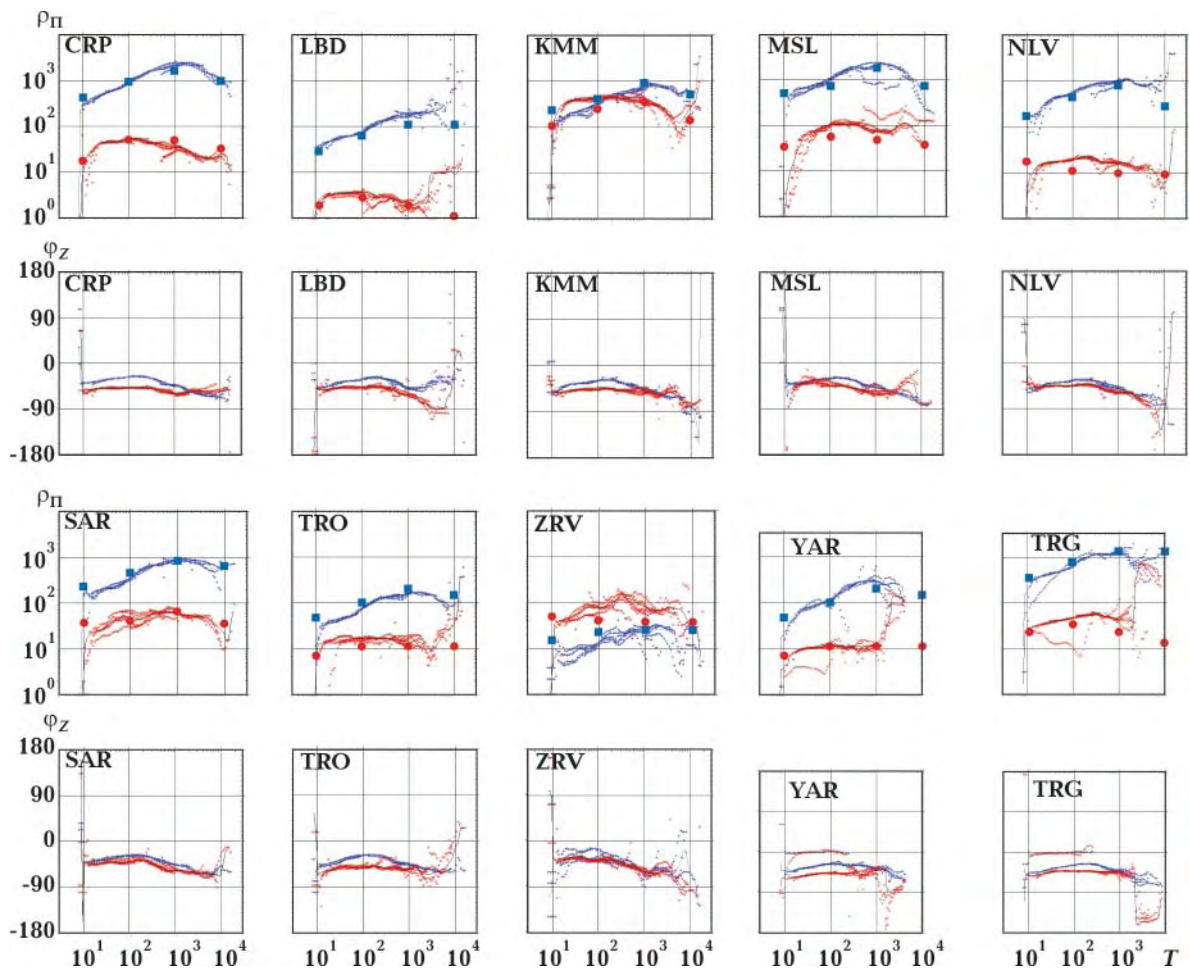


Рис. 3. Криві МТЗ на площі Троянківської структури (сині — субмеридіональна ( $\rho_{xy}$ ), червоні — субширотна ( $\rho_{yz}$ ) орієнтація вимірвальних ліній), отримані за допомогою програми PRC\_MTMV [Варенцов, 2016, Varentsov, 2015] ( $\rho_{\pi}$  — амплітудні,  $\varphi$  — фазові) та розраховані модельні значення  $\rho_{\pi}$  для серії періодів 10, 100, 1000 і 10 000 с.

Таким чином, якісний аналіз експериментальних МВ/МТ параметрів показав, що Троянківська структура характеризується дуже складною будовою у геоелектричному сенсі. З одного боку, це наявність поверхневої локальної тривимірності, на що вказує значна розбіжність кривих  $\rho_{\pi}$  у переважній більшості пунктів спостережень. З іншого — це різка зміна течії телуричних струмів у східній частині планшета та вплив з південного заходу добрепровідних Ємилівського та Краснопільського розломів [Ширков и др., 2017].

**Методика побудови 3D глибинної геоелектричної моделі Троянківської структури ГШЗ.** Більшість об'єктів пошу-

ку в рудній чи структурній геоелектриці, як правило, є складними тривимірними структурами, і тому сучасними засобами аналізу та інтерпретації даних має бути 3D математичне моделювання. Постановка прямої задачі зводиться до розрахунків електричної та магнітної компонент МТ поля за допомогою пакета програмного забезпечення Mtd3fwd [Mackie et al, 1994]. Алгоритм 3D моделювання ґрунтується на інтегральній формі рівняння Максвелла для скінченно-різницевої апроксимації магнітного поля другого порядку і отриманий для нерівномірної мережі. Такий алгоритм забезпечує можливість оцінювання розрахованих полів з точніс-

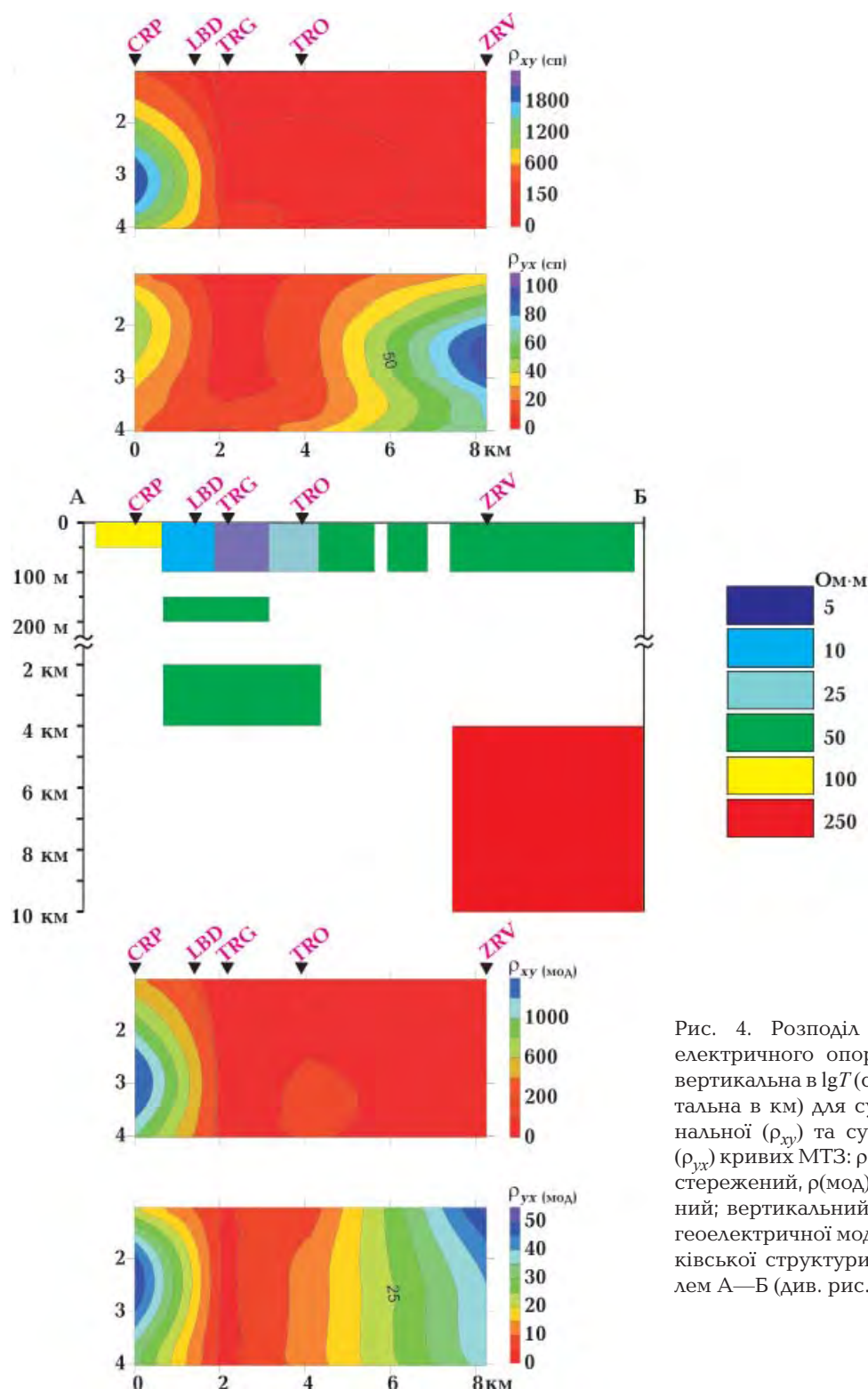


Рис. 4. Розподіл позірного електричного опору (шкали: вертикальна в  $\lg T$  (с), горизонтальна в км) для субмеридіональної ( $\rho_{xy}$ ) та субширотної ( $\rho_{yx}$ ) кривих МТЗ:  $\rho$  (сп) — спостережений,  $\rho$  (мод) — модельний; вертикальний розріз 3D геоелектричної моделі Троянківської структури за профілем А—Б (див. рис. 1).

тю близько 0,01 % від їх повних значень.

Методика побудови локальної тривимірної глибинної моделі розподілу питомого опору в надрах земної кори, як і у випадку Тарасівської структури [Бурахович

та ін., 2018], потребує збереження вимог до розміру комірок та їх кількості, а також урахування впливу на низькочастотне магнітотелуричне поле на локальній ділянці параметрів не лише глибинного «нормаль-

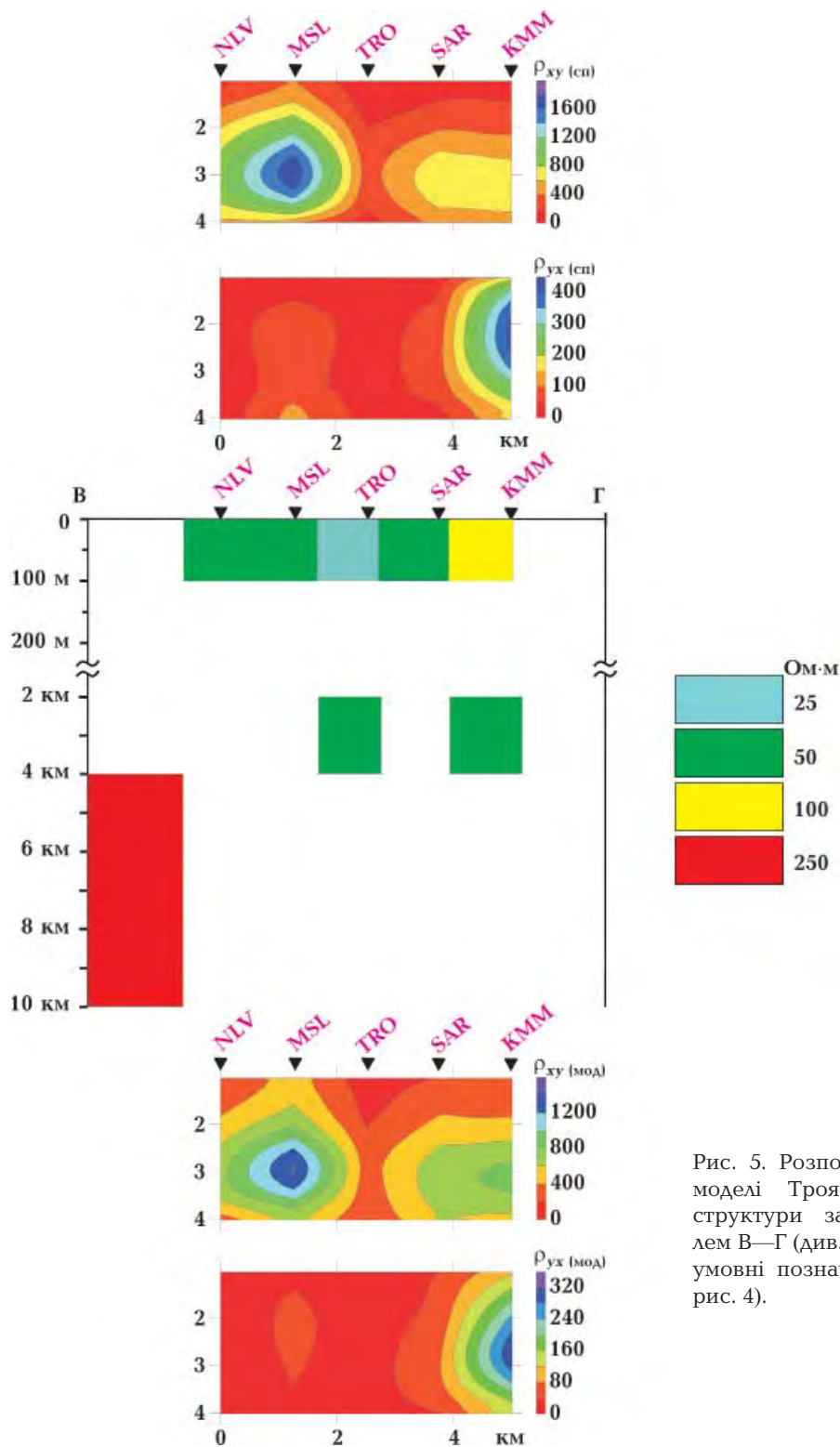


Рис. 5. Розподіл  $\rho$  3D моделі Троянківської структури за профілем В—Г (див. рис. 1 та умовні позначення на рис. 4).

ного» горизонтально-шаруватого розрізу [Бурьянов и др., 1983], а й регіональних латерально-неоднорідних структур, усередині яких розміщені об'єкти дослідження. При створенні моделі розподілу  $\rho$  порід

Троянківської структури було деталізовано ділянку регіонального моделювання ГШЗ [Ширков и др., 2017] та частково продовжено на південь локальну модель Тарасівського планшета [Бурахович та



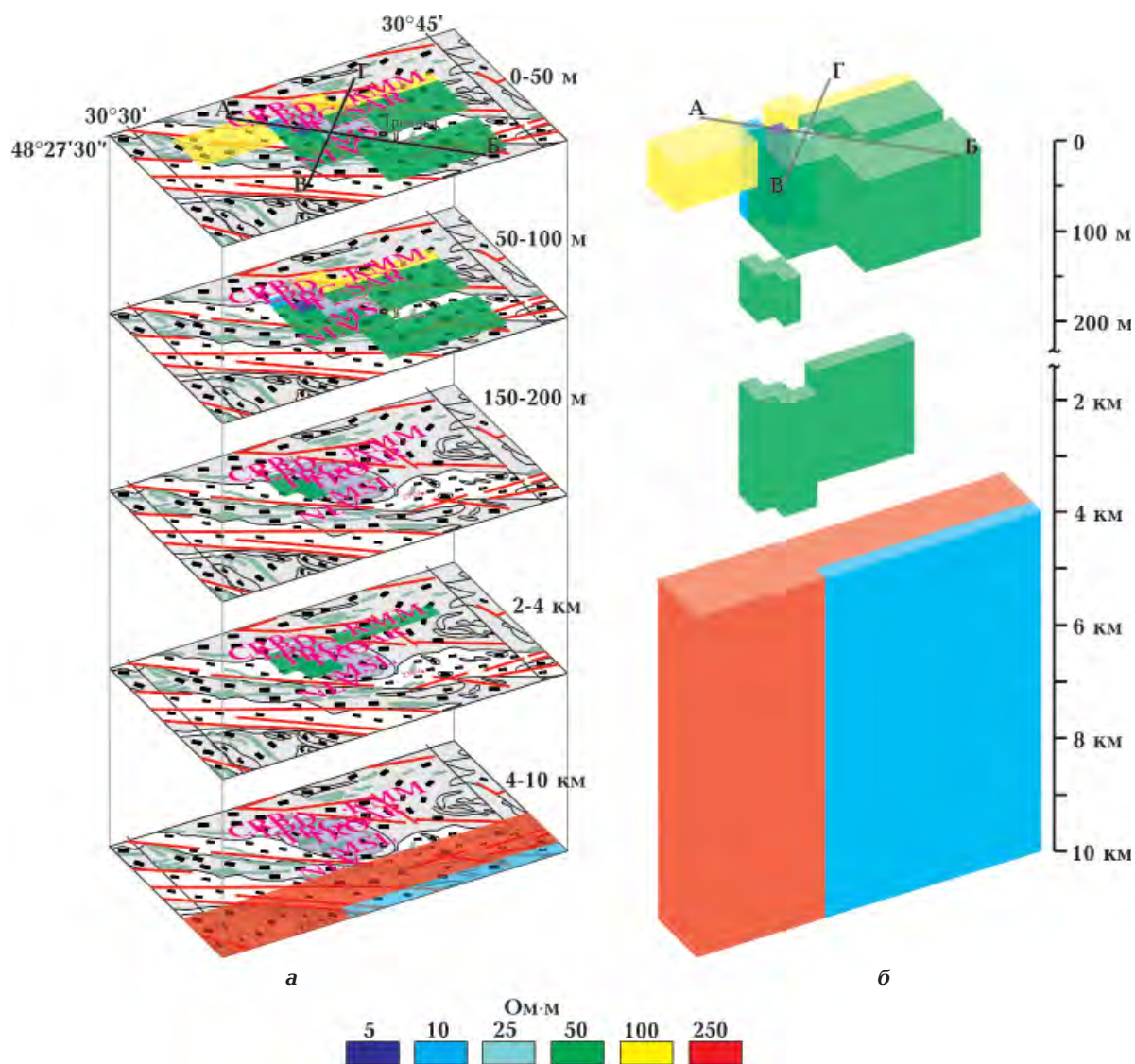


Рис. 6. Аномалії електропровідності планшета Троянківської структури за результатами тривимірного моделювання електромагнітного поля: *а* — на геолого-структурній карті поверхні кристалічного фундаменту ГШЗ, за даними [Гинтов і др., 2016], на глибинах від 10—200 м та від 2—4 до 10 км; *б* — 3D геоелектрична модель.

ін., 2018]. Горизонтальні розміри комірок ділянки моделювання становлять 1×1 км відповідно до напрямків горизонтальних осей моделі ГШЗ, кожна з яких характеризується однорідним  $\rho$ . Вертикальні розміри комірок змінювали від 25 м у верхніх до 40 км у глибинних шарах, як і для моделей ГШЗ і Тарасівської структури. Планшет моделювання Троянківської структури розташований у координатній площині: 30°28' сх.д., 48°28' пн.ш.; 30°46' сх.д., 48°28' пн.ш.; 30°28' сх.д., 48°20' пн.ш.; 30°46' сх.д., 48°20' пн.ш.

3D моделювання глибинних аномалій високої електропровідності полягало в реалізації двох етапів: на першому етапі підбрали таку модель розподілу  $\rho$ , для якої розраховані магнітоваріаційні параметри відповідали б експериментальним даним (див. рис. 2); другий етап передбачав уточнення підбраної моделі за даними МТЗ (див. рис. 3).

На першому етапі моделювання було проаналізовано індукційні параметри моделей ГШЗ, що вже були розраховані у межах Троянківської частини планшета.

Майже на всіх періодах від 100 с величини типерів знаходяться в інтервалі 0,15—0,4 та орієнтовані на північний захід, що, як і при аналізі експериментальних спостережень, можна пояснювати сумісним впливом різнопорядкових аномалій — Кіровоградської та аномалії між Ятранським і Голованівським блоками (на глибинах від 10 до 30 км з  $\rho = 250$  Ом·м, довжина понад 100 км) [Ширков и др., 2017]. Власне Троянківська структура при модельних розрахунках на періодах до 100 с не проявляється, але найменші величини типерів відповідають найбільш електропровідним частинам глибинного Ємилівського та Краснополянського розломів, що проходять по західній межі структури з північного заходу на південний схід.

Другий етап моделювання проводили з використанням даних сучасних МТЗ, виконаних у 2018 р. (рис. 3), порівнювали результати розрахунків для  $T=10, 100, 1000$  та 10000 с, що відповідають різним глибинним рівням (рис. 4, 5).

Предбачається, що значення  $\rho$  на періоді геомагнітних варіацій 10 с залежать, головним чином, від розподілу осадових відкладів, які мають підвищену електропровідність відносно консолідованих кристалічних порід фундаменту УЩ. Однак для Троянківської структури, де такі відклади майже відсутні, провідність першого шару в середньому була прийнята 1 См.

Розглядали декілька варіантів моделей: М1 — поверхневий провідник відповідає геологічній будові Троянківської структури; М2 — за якісною інтерпретацією кривих МТЗ.

Аналіз розрахунків М1 не відповідає експериментальним даним, криві  $\rho_{\Pi}$  хоч і зберігають потрібне співвідношення за поляризаціями, але майже не розходяться за рівнем  $\rho_{\Pi}$ . Було розраховано декілька серій моделей М2 з різними варіантами поширення у просторі електропровідних об'єктів складної форми, що залягають з поверхні до глибин від 10 м до 2 км з  $\rho$  від 1 до 100 Ом·м. Чисельні розрахунки на  $T=10$  с дали змогу визнати найкращими такі параметри верхньої частини моделі (від поверх-

ні до 100 м): осьова частина вздовж Троянківської структури відповідає вузькій (завширшки до 2 км) зоні, яка на півночі представлена як найнижчими (5—25 Ом·м під пунктами LBD, TRG, TRO), так і високими (1000 Ом·м) значеннями, а на півдні виключно останніми значеннями питомого опору та складається з різноорієнтованих тіл з просторовими розмірами  $1 \times 1$ —5 км<sup>2</sup>; її обрамляють два витягнуті гальванічно ізолювані провідники ( $\rho$  від 50 до 100 Ом·м), які загально зорієнтовані з північного заходу на південний схід у східній та субширотно у західній частинах планшета відповідно (рис. 4—6). Субширотно вона розмежується на дві аномально провідні частини: північну (диференційовану за  $\rho$  від 5 до 100 Ом·м і за потужністю від 50 до 100 м) та південну (однорідну за  $\rho = 50$  Ом·м і за потужністю 100 м) частини.

Різку зміну простягання провідників приповерхневої зони у східній частині планшета можна пояснити простяганням добре провідних Ємилівського та Краснопільського розломів, які змінюють свій напрямок на субширотний, що добре узгоджує поведінку спостережених кривих  $\rho_{\Pi}$  у пунктах КММ та ZRV і результат моделювання.

Різниця в розрахунках моделей, за якою обрано оптимальний варіант, становила від 2 до 15 %. Розподіл кривих  $\rho_{\Pi}$  такої моделі наблизився до спостереженого на  $T=10$  с, тут не тільки їх співвідношення є задовільним за поляризацією, а й значення  $\rho_{xy}$  складають інтервал 10—понад 1000 Ом·м, тоді як рівень  $\rho_{yx}$  на порядок більший і менший (див. рис. 3). Утім для  $T=100$  с, незважаючи на збереження необхідного співвідношення кривих за поляризаціями, модельні розрахунки  $\rho_{\Pi}$  у напрямку північ—південь мають тенденцію знижуватися. Тому наступна серія моделей М3 була пов'язана з моделюванням зони високого опору, а саме відбраковано альтернативні моделі, якщо шари високого опору доходили до земної поверхні та одновимірний розріз було зображено лише трьома верхніми шарами.

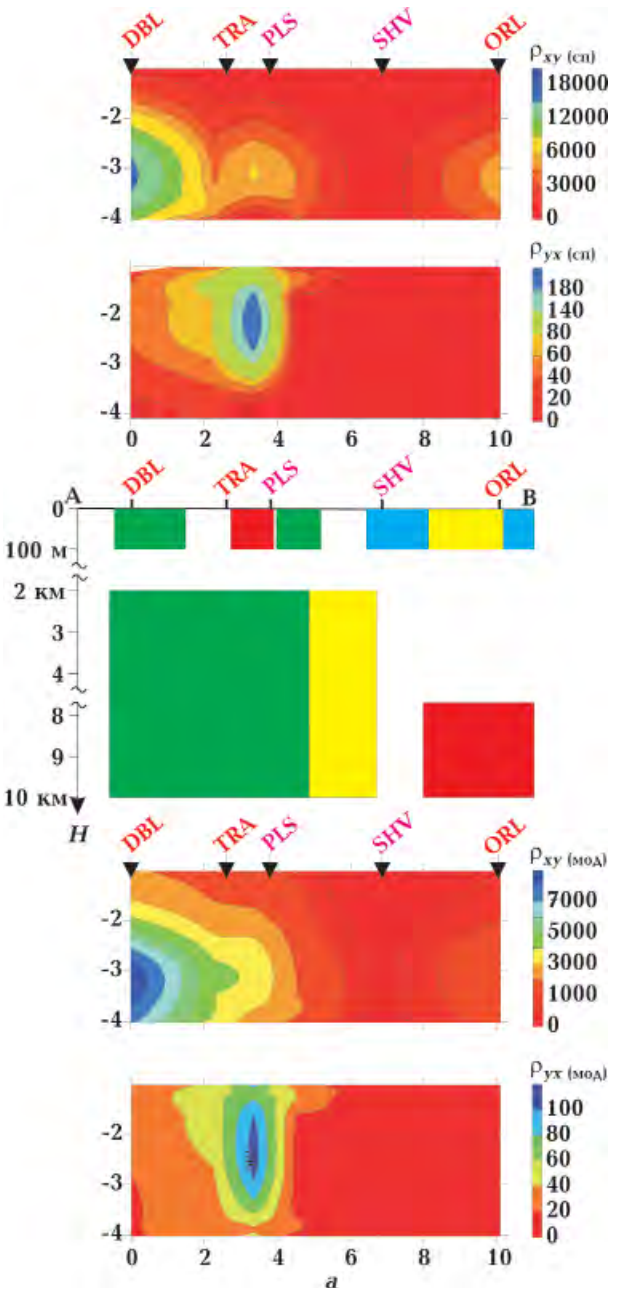
На цьому етапі підібрана модель (нижче

глибини 200 м і до глибини 2 км) характеризується підвищенням нормального фонового опорю з 1000 до 10000 Ом·м. Це дало змогу наблизити розрахунки  $\rho_{\Pi}$  у напрямку північ—південь до спостережених, у деяких пунктах вдалося збільшити їх значення майже на порядок, при цьому рівень  $\rho_{\Pi}$  у напрямку захід—схід, як і очікувалося, не зазнавав суттєвого впливу. Слід підкреслити, що в моделі ГШЗ Корсунь-Новомиргородський плутон та Уманський масив гранітоїдів також характеризувалися високим опором на глибинах понад 10 км.

Крім того, необхідним виявилось введення у модель (для розрахунку  $T=100$  с) додаткового ізолюваного провідного ( $\rho = 50$  Ом·м) об'єкта на глибинах 150—200 м, що має орієнтацію північний захід—південний схід і розташований на північному заході Троянківської структури під пунктами LBD, TRG.

До серії моделей М4 для розрахунку наступного періоду ( $T=1000$  с) було введено дві різноорієнтовані електропровідні зони на глибинах 2—4 км з  $\rho = 50$  Ом·м, які мають просторові розміри 1×5—10 км. Перша аномалія розташована (частково під аномальною зоною на глибинах 150—200 м) уздовж західної межі Троянківської структури та простягається з північного заходу на південний схід під пунктами LBD, TRG, TRG. Друга аномалія просторово відповідає складному вузлу розломів різної орієнтації у північно-східній частині планшета та має субширотне простягання. Введення такого провідника сприяло зміні поляризації та збільшенню розведення кривих  $\rho_{\Pi}$  у пункті КММ, починаючи з періоду геомагнітних варіацій понад 300 с.

Кінцева модель у південній частині планшета на всьому його периметрі характеризується аномалією  $\sigma$ , яку детально описано в регіональній моделі ГШЗ [Ширков и др., 2017], а саме в інтервалі глибин 3—10 км залягає диференційована за  $\rho = 10 \div 250$  Ом·м аномалія майже ізометричної конфігурації ( $50 \times 80$  км<sup>2</sup>), яка розташована у північній частині Голованівського блока та обмежена частинами Тальнівської, Врадіївської, Первомайської та Ємилівської зон розло-



мів. Її відмінністю у моделі Троянківського планшета стало зміщення на 5—7 км на південь та занурення верхньої кромки на 1 км, що не вплинуло на загальну картину результатів моделювання.

Таким чином, розраховані модельні електромагнітні параметри задовольняють експериментальні дані (див. рис. 3—5): поперше, зберігається співвідношення кривих  $\rho_{\Pi}$  за поляризаціями; по-друге, розбіжність кривих  $\rho_{\Pi}$  за напрямками вимірвальних ліній характерна для всього час-

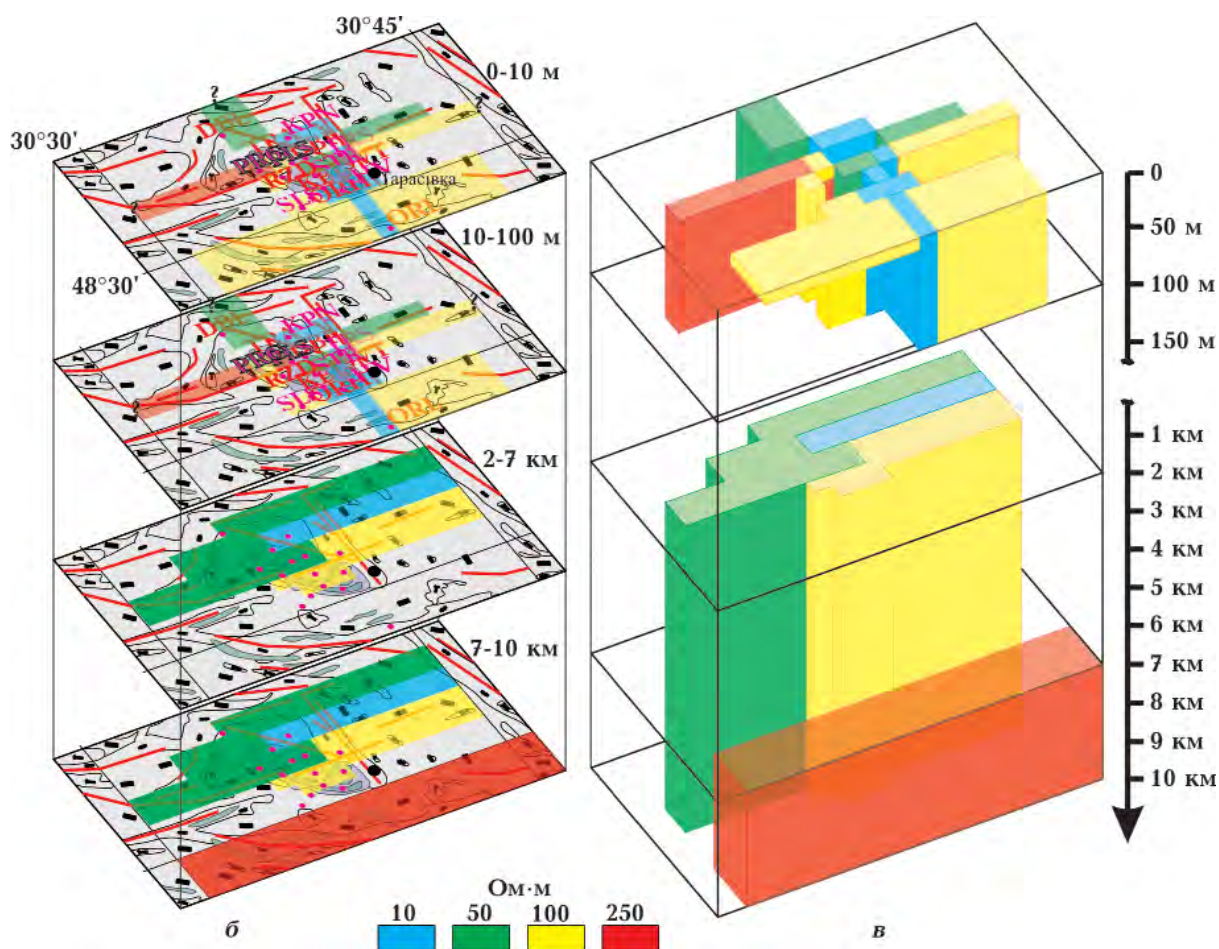


Рис. 7. Аномалії електропровідності планшета Тарасівської структури за результатами тривимірною моделювання електромагнітного поля: *а* — розподіл позірний електричного опору (див. умовні позначення на рис. 4) Тарасівської структури за профілем А—В; *б* — на геолого-структурній карті поверхні кристалічного фундаменту ГШЗ, за даними [Гинтов и др., 2016], на глибинах 0—100 м та від 2 до 10 км; *в* — 3D геоелектрична модель.

тотного діапазону, збільшується з періодом  $T$  і становить до одного порядку; по-третє, найбільша неузгодженість спостерігається на великих періодах і може сягати 1,5 раза за абсолютними значеннями; по-четверте, на коротких періодах похибки можуть становити 15—20 %.

**3D модель Троянківської і Тарасівської структур.** Загалом у геологічних межах Троянківська структура, як і Тарасівська, не проявилася в аномальній величині  $\sigma$ , тоді як тіла розломів різного рангу і орієнтації, що оконтурюють та обмежують ці структури, виявилися складними аномальними об'єктами як у плані, так і за глибиною (рис. 6, 7).

Згідно з результатами 3D моделювання,

Троянківська структура проявилася на різних глибинних ярусах:

*перший* — електропровідний ( $\rho = 5 \div 100$  Ом·м) з поверхні до глибини 100 м відповідає двом гальванічно не з'єднаним провідникам, що простягаються з північного заходу на південний схід та змінюють свій напрямок на субширотний у східній частині планшета з розмежуванням Троянківської структури на північну ( $\rho = 50 \div 100$  Ом·м) та добре провідну південну ( $\rho = 5 \div 50$  Ом·м) частини;

*другий* — електропровідний ( $\rho = 50$  Ом·м,  $150 \div 200$  м), знаходиться у межах структури та відповідає її південно-західній межі;

*третій* — високого опору ( $\rho = 10000$  Ом·м, глибина від 200 м до 2 км);

четвертий — електропровідний ( $\rho = 50$  Ом·м), на глибинах 2—4 км проявляється в околі південно-західної межі та у вигляді субширотного провідника в околі північно-східної межі;

п'ятий — електропровідний ( $\rho = 250$  Ом·м), відповідає глибинам 4—10 км та є північною межею вздовж Ємилівської зони розломів складнопобудованого провідника у Голованівському блоці ГШЗ.

Планшети моделювання локальних Тарасівського та Троянківського метабазитового масивів розташовані майже поряд, а поширення електромагнітної індукції у низькочастотному діапазоні подібне до дифузійних процесів, в яких локальні аномалії  $\sigma$  створюють суттєві ефекти далеко за межами нормальних зон. Тому, наприклад, уперше зону високих значень  $\sigma$  ( $\rho = 250$  Ом·м), що знаходиться між ними, за даними регіонального моделювання [Ширков та ін., 2017] отримано на глибинах 10—30 км, а за результатами локальної побудови [Бурахович та ін., 2018] її піднято на глибини 3—10 км. Саме існування такої видовженої субширотної структури позитивно сприяло розведенню за рівнем кривих  $\rho_{\Pi}$  за поляризаціями у північних пунктах моделі Троянківського планшета. І навпаки, експериментальні дані ГМТЗ і МВП за 2018 р., які отримано в межах обох масивів (див. рис. 1), дали змогу деталізувати параметри глибинної 3D моделі Тарасівської структури (рис. 7, 8). З урахуванням нових спостережень ця глибинна аномалія, як і в попередніх моделях, гальванічно не зв'язана з токовими структурами ні Тарасівського, ні Троянківського планшетів, залягає у північній частині Голованівського блока ГШЗ в інтервалі від 7 до 10 км з  $\rho = 250$  Ом·м та може відповідати не тільки геологічній Журавлинській структурі, а й зоні максимальних градієнтів сили тяжіння.

Сама токопровідна система Тарасівської структури не зазнала суттєвих змін відносно моделі [Бурахович та ін., 2018]. Вище до 100 м модель характеризується мозаїчною будовою та складається з блоків різної орієнтації у просторі, але переважно із субширотним простяганням, уздовж

якого  $\rho$  змінюється від 10 до 250 Ом·м. За розподілом  $\rho$  на цих глибинах геологічну Тарасівську структуру можна поділити на частини: північну — менша ( $\rho$  від 50 до 250 Ом·м) та південну — більша ( $\rho$  від 10 до 100 Ом·м) величина  $\sigma$ . Нижче за 100 м вміне середовище характеризується високим опором 10 000 Ом·м. В інтервалі глибин від 2 до 10 км поміж субширотних розломів аномалія  $\sigma$ , яка звужується на захід та розширюється на схід, поділяється на три зони з різним опором: західно-північну з  $\rho = 50$  Ом·м, центрально-східну з  $\rho = 10$  Ом·м та південно-східну з  $\rho = 100$  Ом·м. Друга зона, субширотно витягнута на відстань близько 13 км, розміщується за межею Тарасівської структури та просторово залягає під блоком з найвищою електропровідністю на глибинах до 100 м.

**Висновки.** За даними експериментальних низькочастотних МТ/МВ спостережень, результатами їх обробки та інтерпретації, на основі геоелектричної моделі ГШЗ побудовано детальні тривимірні моделі розподілу питомого опору площ Тарасівського та Троянківського метабазитових масивів. Слід підкреслити, що отримані тривимірні геоелектричні моделі самих Тарасівської та Троянківської структур суттєво різняться. Якщо у першій чітко можна виділити поверхневий (до глибини 100 м) та глибинний (2—10 км) шари, причому останній несе суттєве навантаження та деякі блоки просторово збігаються, то у другій — крім добре поширеного поверхневого шару ще існує кілька локальних зон на різних глибинних рівнях, але тільки до верхніх 4 км, які перемежуються з шарами високого опору. Становить інтерес наявність на півдні (або поміж шарами) в обох моделях субширотних глибинних провідників (від 4—7 до 10 км), які просторово збігаються з геологічно-геофізичними структурами. І хоча в геологічних межах структури повністю не проявилися у аномальній величині  $\sigma$ , об'єднувальною рисою двох моделей є фрагментарний прояв низьких значень  $\rho$  від 5 до 100 Ом·м саме у тілі метабазитових масивів. Проте впевнено можна стверджувати про високу елек-

тропровідність розломів різного рангу та їх перетинів, що оточують згадані масиви. Високу електропровідність можна пояснити особливим складом порід земної кори (графітизацією, сульфідизацією тощо) або флюїдизацією різного походження. Все частіше за останніми даними природу аномалій розглядають як результат спільної дії електронного та іонного типів електропровідності.

Тарасівську та Троянківську структури, які можуть потенційно нести специфічне рудне навантаження (алмазонність, рідкісні і кольорові метали) [Гинтов и др., 2016, 2018], вважають найважливішими в межах Ятранського блока ГШЗ, який обмежений на заході Тальнівською, на півдні — Ємилівською, на сході — Первомайською зонами розломів. Ятранський блок підстелений неоднорідним і порушеним розрізом кори. Відбувається східчає занурення поверхні базальтового шару на північ по широтних скидових розломах, що відображається на тривимірній моделі електропровідності (глибини 2—10 км) у вигляді чергування вузьких блоків різного електроопору з підпиранням глибинними мафітами та ультрамафітами на глибинах 3–12 км.

Як відомо, загальною та характерною особливістю розміщення рудопроявів на щитах є сукупність літологічних і структурних чинників і насамперед розривних порушень глибинного закладення. У межах досліджуваної території виділено астеносферний лінеамент як зону перепаду потужності літосфери та східну межу геоелектричної астеносфери [Ширков и др., 2017]. Ця зона відіграє провідну роль у контролі розміщення рудних об'єктів, незважаючи на їх приуроченість до різ-

них металогенічних таксонів (структурно-формаційних підзон). На ділянках перетину розломів північно-східного простягання з глибинними зонами розломів північно-західного та субмеридіонального напрямків — Тальнівською, Капітанівською, Врадіївською та іншими спостерігаються скупченість родовищ і рудопроявів, а також прямі пошукові ознаки їх об'єднання у відомі рудні поля та площі, перспективні для подальшого вивчення. Наявність уступу поділу М біля Тарасівської та Троянківської структур та зони зсувів на півдні планшета моделювання вказує на перспективність зазначеної території. Найперспективнішими є вузли перетину субмеридіональних і широтних зон.

Установлено, що низькоомні аномалії переважно приурочені до зон метасоматозу уздовж протяжних зон розломів на сході ГШЗ і до районів поширення графітизованих гнейсів та сланців у західній частині шовної зони; в їх межах (або в межах їх проєкцій на земну поверхню) розміщуються більшість родовищ і рудопроявів корисних копалин [Ширков и др., 2017]. Залучення результатів експериментальних досліджень методами МТЗ і МВП, даних структурного аналізу, геохімії, мінералогії дає змогу виконувати регіональне і локальне прогнозування рудопроявів корисних копалин у межах як ГШЗ, так і в цілому УЩ.

Публікація містить результати досліджень, проведених за грантової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф-83 та Цільової комплексної програми НАН України «Мінерально-сировинна база України як основа безпеки держави».

### Список літератури

- Бурахович Т. К., Ільєнко В. А., Кушнір А. М., Ширков Б. І. Тривимірна глибинна геоелектрична модель Тарасівської структури Голованівської шовної зони. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 2. С. 106—120. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128934>.
- Бурьянов В. Б. Гордиенко В. В., Кулик С. Н., Логвинов И. М. Комплексное геофизическое изучение тектоносферы континентов. Киев: Наук. думка, 1983. 176 с.
- Варенцов Ив. М. Развитие программной систе-

- мы PRC\_MTMV многоточечной обработки данных синхронных МТ/МВ зондирований. *Вопросы естествознания*. 2016. № 3(11). С. 48—52.
- Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. Под ред. А. В. Анциферова. Донецк: Вебер, 2008. 305 с.
- Гинтов О. Б., Пашкевич И. К. Тектонофизический анализ и геодинамическая интерпретация трехмерной геофизической модели Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 2. С. 3—27. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i2.2010.117553>.
- Гинтов О. Б., Ентин В. А., Мычак С. В., Павлюк В. Н., Гуськов С. И. Уникальные базит-метабазитовые структуры Побужского горнорудного района, их геологическое значение и перспективы рудоносности (по геофизическим и геологическим данным). *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 3. С. 3—26. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137170>.
- Гинтов О. Б., Ентин В. А., Мычак С. В., Павлюк В. Н., Зюльде 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. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777>.
- Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых. Под ред. В. И. Старостенко, О. Б. Гинтова. Киев: Прасты луды, 2013. 500 с.
- Нечаев С. В., Наумов Г. Б. Региональная зональность оруденения Украинского щита: Современный план и палеотектонические реконструкции. *Геология рудных месторождений*. 1998. Т. 40. № 2. С. 124—136.
- 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.
- Очерки геодинамики Украины. Под ред. В. И. Старостенко, О. Б. Гинтова. Киев, 2018. 466 с.
- Пристай А. Н., Проненко В. А., Корепанов В. Е., Ладанивский Б. Т. Роль электрических измерений при глубинном магнитотеллурическом зондировании Земли. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 173—182. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111062>.
- Смирнов В. П. Глубинные источники рудного вещества эндогенных месторождений. Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Киев: Наук. думка, 1971. С. 245—253.
- 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>.
- 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. Трехмерная геоэлектрическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 1. С. 41—58. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i1.2017.94010>.
- Mackie, R. L., Smith, J. T., & Madden, T. R. (1994). Three-dimensional electromagnetic modelling using finite difference equation: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923—935. <https://doi.org/10.1029/94RS00326>.
- Varentsov, Iv. M. (2015). Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis and inversion. In *EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice* (pp. 271—299). Elsevier.

## Deep geoelectric studies of the Troyankiv and Tarasivka metabasite massifs of the Golovaniv suture zone

A. M. Kushnir, T. K. Burakhovich, V. A. Ilyenko, B. I. Shyrkov,  
I. Yu. Nikolayev, 2019

Results of experimental observations of low-frequency natural alternating electromagnetic field of the Earth of external ionospheric-magnetospheric origin, conducted in 2017 – 2018 in the territory of the Yatran block of the Golovaniv suture zone of the Ukrainian shield have been presented. After application of procedures of synchronous rating of transmitting operators of MT/MV fields with the help of the program complex PRC-MTMV complex induction parameters have been obtained for the periods from 50 to 10000 s. and amplitude curves of visible resistivity and phases of impedance for the wide range of periods from 10 to 10000 s. Qualitative analysis of experimental parameters has demonstrated that the Troyankiv and the Tarasivka structures are specified by a very complicated structure in geoelectric aspect. On the one hand, it is the presence of surface local three-dimensionality indicated by considerable discrepancy of curves  $\rho_{II}$  in prevailing majority of observation sites. On the other hand it is the dramatic change of flow of telluric currents in the eastern part of the pad and the influence of high-conducting Yemyliv and Krasnopolyana faults situated to the southwest. Three-dimensional geoelectric models of the Tarasivka and Troyankiv structures plotted with application of legacy software Mtd3fwd differ essentially. If in the first one we can distinctly specify the surface up to 100 m and the deep 2–10 km layers, the last ones with essential loading at that and some blocks spatially coinciding, in the second one in addition to well-developed surface up to 100 m layer several local zones at different depth levels exist but only up to top 4 km which alternate with layers of high resistance. An interesting point is the presence in both models in the south (or between them) sub-latitudinal deep conductors 4–7 — 10 km, spatially coinciding with geologic-geophysical structures. And though within geological margins the structures do not completely manifested in abnormal electric conductivity, the unifying feature of both models is a fragmental manifestation of low values  $\rho$  from 5 to 100 Ohm-m in the bodies of metabasite massifs exactly. But we can certainly affirm on high conductivity of faults of different rank and their surrounding cross-sections. High electric conductivity can be explained by a special composition of rocks of the Earth crust (graphitization, sulfidization etc.) or fluidization of different origin.

**Key words:** the Golovaniv suture zone, 3D geoelectric model, magnetotelluric sounding, magneto-variational profiling, deep structure, anomalies of electro-conductivity.

### References

- Burakhovych, T. K., Ilyenko, V. A., Kushnir, A. M., & Shyrkov, B. I. (2018). Three-dimensional deep geoelectric model of the Tarasovska structure of the Golovanivsk suture zone. *Geofizicheskii zhurnal*, 40(2), 106—120. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128934> (in Russian).
- Buryanov, V. B. Gordienko, V. V., Kulik, S. N., & Logvinov, I.M. (1983). *Integrated geophysical study of the tectonosphere of continents*. Kiev: Naukova Dumka, 176 p. (in Russian).
- Varentsov, Iv. M. (2016). Development of the PRC\_ MTMV software system for multipoint data processing of synchronous MT/MV soundings. *Voprosy yestestvoznaniya*, (3), 48—52 (in Russian).
- Antsiferov, A. V. (Ed.) (2008). *Geological and geophysical model of the Golovanevskaya suture zone of the Ukrainian shield*. Donetsk: Weber, 253 p. (in Russian).
- Gintov, O. B., & Pashkevich, I. K. (2010). Tectonophysical analysis and geodynamic interpretation of the three-dimensional geophysical model of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskii*



- zhurnal*, 32(2), 3—27. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i2.2010.117553> (in Russian).
- Gintov, O. B., Entin, V. A., Mychak, S. V., Pavlyuk, V. N., Guskov, S. I. (2018). Unique basite-metabasite structures of the Pobuzhsky ore mining region, their geological significance and ore-bearing prospects (by geophysical and geological data). *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(3), 3—26. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137170> (in Russian).
- Gintov, O. B., Entin, V. A., Mychak, S. V., Pavlyuk, V. N., & Zyuultse, V. V. (2016). Structural-petrophysical and tectonophysical base of geological map of crystalline basement of the central part of Golovanevsk suture zone of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(3), 3—28. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777> (in Russian).
- Starostenko, V. I., & Gintov, O. B. (2013). *The Kirovograd ore area. Deep structure. Tectonophysical analysis. Ore deposits*. Kiev: Prastyi ludy, 500 p. (in Russian).
- Starostenko, V. I., & Gintov, O. B. (Eds.). (2018). *Essays geodynamics Ukraine*. Kiev, 446 p. (in Russian).
- Nechaev, S. V., & Naumov, G. B. (1998). Regional zonation of mineralization of the Ukrainian shield: Modern plan and paleotectonic reconstructions. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 40(2), 124—136 (in Russian).
- Nikolaev, I. Yu., Sheremet, E. M., Burakhovich, T. K., Krivdik, S. G., Kalashnik, A. A., Nikolaev, Yu. I., Setaya, L. D., & Agarkova, N. G. (2014). *Ingulsky megablock Ukrainian shield (deep geoelectric model and minerals)*. Donetsk: Noulidzh, 180 p. (in Russian).
- Pristay, A. N., Pronenko, V. A., Korepanov, V. E., & Ladanivskiy, B. T. (2014). Role of electrical measurements at deep magnetotelluric sounding of the Earth. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(6), 173—182. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111062> (in Russian).
- Smirnov, V. P. (1971). *Depth sources of ore matter of endogenous deposits. The relationship of the surface structures of the earth's crust with the deep* (pp. 245—253). Kiev: Naukova Dumka (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).
- Shyrkov, B. I., & Burakhovych, T. K. (2017). Electromagnetic methods for the prediction of minerals ores. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universtetu 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 zone of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 39(1), 41—58. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-100.v39i1.2017.94010> (in Russian).
- Mackie, R. L., Smith, J. T., & Madden, T. R. (1994). Three-dimensional electromagnetic modelling using finite difference equation: the magnetotelluric example. *Radio Science*, 29, 923—935. <https://doi.org/10.1029/94RS00326>.
- Varentsov, Iv. M. (2015). Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis and inversion. In *EM sounding of the Earth's interior: theory, modeling, practice* (pp. 271—299). Elsevier.