

УДК 550.372/373+551.24.055

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.07>

Т. Бурахович, д-р геол. наук,

E-mail: burahovich@ukr.net;

А. Кушнір, д-р геол. наук,

E-mail: anton@ukr.net;Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
просп. Акад. Палладіна, 32, м. Київ, 03680, Україна

ІСТОРІЯ, СУЧАСНИЙ СТАН ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ГЕОЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В УКРАЇНІ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Розглянуто сучасний стан та перспективи розвитку геоелектромагнітних методів. Обговорено проблеми та способи їх розв'язання, нові ідеї та завдання. Проаналізовано сучасні експериментальні методики спостережень, універсальні програмні комплекси їх обробки, методику побудови тривимірних моделей різних геолого-тектонічних одиниць України. Наведено результати геолого-геофізичної інтерпретації регіональних та локальних тривимірних моделей. Виявлено геоелектричні неоднорідності у земній корі та верхній мантії України, які характеризуються аномально низькими та аномально високими значеннями електричного опору. Зони високої електропровідності, що виходять на поверхню, визначаються субвертикальною неоднорідністю та утворюють гальванічно пов'язану систему. Вона просторово корелює з глибинними розломами різного рангу, що виділені за геологічними даними. Природа аномалій електропровідності на глибині до 2,5 км зумовлена наявністю асоціації електропровідних мінералів (сульфідів, графіту) у зонах метасоматичної переробки порід, що ведуть до утворення рудної мінералізації (уран, золото, рідкісні метали). У земній корі на глибинах 5–30 км і верхньої мантії 50–120 км, найімовірніше, відображають сліди впливу сучасних мантіїних флюїдів. Все частіше за останніми даними природу аномалій розглядають як результат спільної діяльності електронного та іонного типів електропровідності. Аномалії електропровідності земної кори та верхньої мантії свідчать про можливі зони проявів геодинамічної активізації, а глибинні розломи визначаються зонами підвищеної проникності, якими крізь літосферу відбувається розвантаження мантіїних флюїдів. Зокрема висвітлено зв'язок аномалій електропровідності на території України з процесами формування нафтогазових і рудних родовищ корисних копалин.

Ключові слова: геоелектромагнітні методи, інтерпретація тривимірної моделі, аномалії електропровідності, корисні копалини.

Постановка проблеми. Проблема дефіциту енерго-ресурсів особливо у воєнний та повоєнний час вимагає нових підходів, які могли б узагальнити всю наявну інформацію про фізико-хімічні процеси утворення і накопичення вуглеводнів, а також їх проявах у фізичних полях. Як відомо, природні явища, що спостерігаються в земній корі, зумовлені взаємодією екзогенних і ендегенних процесів, пов'язаних із висхідними потоками флюїдів від впроваджених у кору мантіїних діапів або розігрітих ділянок мантії. Це веде до формування вуглець-, сульфід- та залізовмісних метасоматитів, а також до утворення рудних та нафтогазових родовищ. Багато вчених дотримуються думки, що ці перетворення за своїм характером глибинні та спричинені флюїдними процесами і дегазацією земних надр. Остання нерозривно пов'язана з вертикальними і субвертикальними зонами руйнування гірських порід, які проявляються як зони, розущільнення, концентрації напружень і тріщинуватості. Вони мають особливі, найчастіше досить контрастні, геофізичні властивості. Важливо досліджувати всі можливі фізичні параметри, доступні для польового та лабораторного експерименту, включаючи розподіл електричних властивостей, який пов'язаний зі складом, станом гірських порід і глибинними процесами в надрах земної кори і мантії, та оцінюється методами глибинної геоелектрики.

Методи дослідження геоелектричної будови земних надр базуються на вивченні індукції зовнішнього іоносферно-магнітосферного електромагнітного поля Землі в середовищі, що характеризується високою електропровідністю порівняно з провідністю атмосфери. Метод магнітотелуричного зондування (МТЗ) використовується у випадку горизонтально-шаруватого середовища, яке не містить локальних неоднорідностей електропровідності. З іншого боку, метод магнітоваріаційного профілювання (МВП) ґрунтується на аналізі індукції первинного поля в локальних неоднорідностях середовища. В основі МТЗ та МВП методів лежить індукційний принцип, що базується на явищі скін-ефекту – пропорційній залежності

глибини проникнення електромагнітного (ЕМ) поля від періоду його коливань.

Проходить час, і частина уявлень про глибинні геофізичні феномени переглядається завдяки використанню сучасних експериментальних даних, появі нових ідей інтерпретації та розвитку інструментів дослідження розподілу фізичних параметрів у надрах Землі. Сучасні експериментальні геоелектричні дослідження із застосуванням новітньої апаратури, обробка їх результатів на основі універсальних пакетів програм та інтерпретації даних для тривимірно-неоднорідних (3D) середовищ, можуть забезпечити виявлення геоелектричних неоднорідностей та вивчення літосфери України, її тектонічних особливостей, а також зон прояву геодинамічних процесів, що досліджуються з погляду формування та розміщення родовищ і рудопроявів корисних копалин, зокрема горючих.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Застосування методів глибинної геоелектрики в історії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка та його періодичного фахового видання "Вісник. Геологія" тісно пов'язані з іменами відомих випускників, учених, викладачів та загалом обдарованих фахівців геофізиків. До сьогодні залишаються актуальними та перспективними при пошуках нафтогазових покладів в умовах тонкошаруватого середовища проблеми, які досліджував А.А. Гроза, а саме, розвиток теорії нестационарних ЕМ полів у електропровідних середовищах та розробку методів геоелектричних досліджень земних надр. Його співавтором та послідовником є М.В. Рева. Потужний внесок у розвиток загальної теорії ЕМ зондувальних систем та імпедансних вимірів у методах геоелектромагнетизму, а також дослідження інтегральної кінематики ЕМ збурень у дифузійній області, швидкісних параметрів в георадарних та томографічних ЕМ системах, особливостей та систем ЕМ зондувань у середовищах з дисперсією зробив В.М. Шуман для розв'язання існуючих фундаментальних проблем сучасної геофізики.

© Бурахович Т., Кушнір А., 2023

Наукові інтереси Сергія Миколайовича Кулика були тісно пов'язані з вивченням глибинної будови земної кори і верхньої мантії МТЗ, глибинним МТЗ (ГМТЗ) та МВП. Він зробив вагомий внесок у проведення експериментальних досліджень як на території України, так і за її межами, плідно працював над розвитком методів обробки та інтерпретації експериментальних даних, узагальненням та побудовою геолого-геоелектричних моделей, проведенням їх комплексної інтерпретації. До наукової школи Сергія Миколайовича відносять себе автори даної статті та їх колеги: Є.М. Тонковид, Б.І. Ширков, В.А. Ільєнко. Одним з провідних учених України в галузі застосування ЕМ полів для пошуків родовищ корисних копалин та прогнозування землетрусів, розробником комп'ютеризованих геофізичних технологій та апаратурних комплексів був В.І. Трегубенко.

Викладаючи лекції на кафедрі геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка, С.М. Кулик згадував про засновника теорії класичної магнітотелурики Марка Наумовича Бердичевського: "Дитинство, доросле та наукове життя Марка Наумовича були тісно пов'язані з Україною та Києвом. Його однокурсник Є.Г. Коровніченко, який згодом викладав курс сейсморозвідки в Київському університеті, розповідав, що М.Н. Бердичевський був непересічною особистістю, ветераном війни, старшим другом. Він любив читати вірші біля вікна в коридорах другого чи третього поверху Червоного корпусу (в той час там був факультет геології) і сам їх писав". М.Н. Бердичевський був провідним ученим світу, який працював не тільки над розробкою теоретичних основ та методів цифрової обробки МТ та МВ спостережень, геологічною інтерпретацією кривих ЕМ зондування в умовах неоднорідних середовищ, розвитком методу глобального частотного зондування, але й організував і очолював більшість експериментальних проєктів, спрямованих на виявлення електропровідних шарів у земній корі та верхній мантії, а також підвищення геологічної ефективності електророзвідки. У повоєнній Україні ця галузь швидко розвивалася. Внесок Марка Наумовича в усі результати української геоелектрики був вирішальним і вагомим (*Berdichevsky and Dmitriev, 2008*).

Майбутній розвиток ЕМ методів, означений Володимиром Миколайовичем Шуманом (Шуман, 2012), залишається перспективним та актуальним завданням наукових досліджень. Багато його ідей значно випередили свій час. Володимир Миколайович проаналізував ключові положення геоелектродинаміки, важливі з погляду їх застосування, зокрема, з урахуванням фізичного та математичного аспектів проблеми, уточнив деякі положення імпедансного підходу в сучасній геоелектриці (Шуман і Савин, 2011). Фактично він передбачив майже всі теоретичні і технічні аспекти сучасного стану та розвитку ЕМ зондуючих систем на десятиліття вперед. Підкреслив необхідність заміни "класичної" електродинамічної парадигми на парадигму фрактальної електродинаміки нестійкого середовища, яка об'єднує фрактальну геометрію і теорію електромагнетизму. Зазначив, що застосування теорії фракталів, детермінованого хаосу, масштабної інваріантності (скейлінгу) й дробних операторів відкриває додаткові можливості і перспективи в обробці даних спостережень та підвищує інформативність зондуючих систем, орієнтуючи їх на одержання якісно нової інформації про геосередовище. На жаль, сьогодні цей напрям складно реалізувати в повному обсязі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Територія України належить до однієї з найбільш вивчених ЕМ методами регіонів Європи. Це не

лише дослідження інститутів Академії наук (роботи О.П. Бондаренко, І.І. Рокитянського, С.М. Кулика, І.М. Логвинова, Я.С. Сапужака, А.І. Білінського, В.М. Шумана, В.В. Белявського, Є.М. Шеремета та ін.), а й в основному роботи геофізичних організацій геологічних служб України, проведені під керівництвом провідних геоелектриків А.І. Інгерова, В.І. Трегубенка, С.Г. Кремера, І.А. Свириденка, за даними яких отримано понад дві з половиною тисячі пунктів експериментальних спостережень методами МТЗ і МВП. З метою пошуку рудних і горючих корисних копалин проведено аудіо-МТЗ (АМТЗ) дослідження на локальних ділянках Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), Донбасу, Українського щита (УЩ), Переддобрудзького прогину (ПП) та Скіфської плити (СП). У результаті АМТЗ спостережень складено моделі золоторудних і нафтових родовищ та здійснено пошук перспективних ділянок у межах структурних зон. Всі ЕМ дослідження в широкому діапазоні періодів показали, що в геоелектричному аспекті як земна кора, так і верхня мантія території України є істотно неоднорідними (*Ingerov et al., 1999; Белявский и др., 2001*).

Моделі розподілу аномалій електропровідності у земній корі та верхній мантії різних геологічних регіонів України розглядалися у 80-х роках ХХ ст. у межах двовимірних апроксимацій середовища. Існували уявлення, наприклад, що для побудови нормальної кривої позірною питомого опору УЩ, необхідно використовувати дані ГМТЗ, зареєстровані на території Волино-Подільської плити (ВПП), у зв'язку з тим, що передбачалася відсутність суттєвих глибинних горизонтальних неоднорідностей електропровідності. А вже на початку ХХІ ст., коли було накопичено великий обсяг експериментальних даних (*Ingerov et al., 1999; Белявский и др., 2001*) і з'явилися нові методи вирішення прямих та зворотних задач для складних середовищ (авторські права на програмну підсистему SW-IEM3D належать Петеру Вайдельту, математичне моделювання, 1977–1993 рр.), були побудовані глибинні квазітривимірні плівкові моделі (*Burakhovich et al., 2001*). Сумісний аналіз квазітривимірних плівкових і двовимірних моделей дав об'ємне уявлення про глибинний розріз кори та мантії Землі. Виділено та побудовано глибинні геоелектричні моделі земної кори та верхньої мантії території України, що містять області з аномально високою електропровідністю: Коростенська (H=15 км, S=500 См), Гайворон-Добровеличківська (H=0,1 км, S=2000 См), Кіровоградська (H=10–25 км, S=100–20000 См), Приазовська (H=1–2 км, S=2000 См), Волинська (H=2,5 км, S=1000 См), Чернівецько-Коростенська (H=15 км, S=1000 См; H=70 км, S=2000 См), Яворівська (H=15 км, S=1000 См; H=70 км, S=1200 См), Донбаська (H=2 км, S=500–20000 См; H=10 км, S=1000–10000 См), Тарханкутська (H=10 км, S=5000 См; H=60 км, S=5000 См), Керченська (H=2 км, S=2500 См; H=5 км, S=5000 См), Гірського Криму (H=2 км, S=1000 См), Степового Криму (H=5 км, S=5000 См), Добрудзьська (H=15 км, S=5000 См; H=70 км, S=1000 См), Карпатська (H=15 км, S=20000 См; H=70 км, S=6000 См), де H – глибина залягання плівки, S – сумарна позовжня провідність. Експериментальні дані, які були використані, не мали достатньої точності для побудови детальніших об'ємних тривимірних моделей. Крім того, існуючий на сьогодні результат геоелектричної моделі у вигляді розподілу S земної кори і верхньої мантії території України залишає невирішеними багато питань, а саме: не визначено розподіл значень питомого електричного опору (ρ) гірських порід та потужності електропровідних об'єктів; не оцінено рівень впливу на отримані

результати електричних властивостей поверхневих структур, тобто не розраховувалася взаємодія, а також вплив та взаємодія глибинних регіональних аномалій та локальних об'єктів; не пояснена природа високої електропровідності і зв'язок геоелектричних властивостей з геологічними і тектонічними об'єктами.

Відповіді на ці питання можуть бути отримані завдяки побудові об'ємних моделей розподілу питомого опору в земній корі та верхній мантії. Нові результати можна досягти лише із сучасним підходом до експериментальних спостережень, обробки даних та методики інтерпретації. Геоелектрика в Україні нині переживає період переходу від вже вичерпаних можливостей існуючих методів досліджень та уявлень про горизонтально-шарувату структуру середовища. Сучасна цифрова апаратура дає змогу застосовувати нову систему спостережень та обробки даних. З цього погляду найбільше підходить методика синхронної реєстрації п'яти компонент поля для підмножин мережі пунктів спостережень. Однак на цьому етапі ми перебуваємо на самому початку шляху. Сучасні дані ЕМ поля є фундаментом для якісної та кількісної інтерпретації та стають основою для побудови різного роду 3D геоелектричних моделей (Бурахович і др., 2015; Шеремет і др., 2016).

Мета – дослідження особливостей будови земної кори та верхньої мантії на основі тривимірної моделі розподілу електричного опору, що побудована за експериментальними даними ГМТЗ і МВП; пояснення природи аномалій високої електропровідності за геолого-геоелектричною інтерпретацією моделей у зв'язку з пошуком перспективних на корисні копалини структур різних регіонів України.

Експериментальні спостереження та їх обробка. Всі сучасні польові експерименти було зроблено за методикою синхронного спостереження МТ/МВ полів з використанням двох довгоперіодних цифрових апаратурних комплексів серії LEMI-417 (розробка Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН України та Державного космічного агентства України) з ферозондовими магнітометрами. Їх головними перевагами є дуже низький часовий дрейф ($< \pm 5$ нТл/рік) і висока точність вимірів (0,02 % протягом двох років), що є надзвичайно ефективним при глибинних зондуваннях земної кори і верхньої мантії. Синхронізація станцій здійснювалася за допомогою GPS приймача. Дослідження проводились як у профільному, так і площинному варіантах. Відстань між пунктами від 1 до 5–10 км (іноді до 30 км) та час спостереження (від 10 год до 40 діб) на кожній окремій точці визначались поставленими завданнями та реальними польовими умовами проведення експерименту.

Більшість сучасних методів оцінювання передавальних операторів ґрунтовані на загальних принципах гармонічного аналізу і робастних способах лінійного оцінювання в частотній області. Після відбракування некондиційних записів та придушення завад (препроцесінг) проводиться послідовний Фур'є-аналіз відрізків послідовностей варіацій і накопичення лінійних рівнянь, що пов'язують спектральні компоненти МТ полів, для кожного інтервалу періодів оцінювання. Отримані надлишкові системи рівнянь вирішуються частинами з подальшим осередненням чи цілком. Такий підхід реалізовано за допомогою двох широковідомих та добре оцінених у геоелектричному співтоваристві програмних комплексів: PRC_MTMV, що забезпечує спільне перешкодозахищене оцінювання імпедансу та комплексних індукційних параметрів за синхронними МТ/МВ-записами, та PTS. Завдяки сучасному підходу до обробки експериментальних синхронних

МТ/МВ зондувань були отримані криві ГМТЗ (амплітудні та фазові позірного питомого опору ρ_n) для широкого діапазону періодів 10–10000 с, типпері для періодів 50–4000 с та горизонтальний магнітний тензор [M] на періодах від 10 до 10000 с у різних геологічних структурах України (на сьогодні загальна кількість становить 207 пунктів). Хоча обробка дозволяє отримувати діаграми передавальних операторів МТ поля, візуалізація у вигляді наборів псевдорозрізів найінформативніших компонент функцій відгуку дає можливість наочного відображення результатів, особливо при виявленні в просторі локальних неоднорідних зон високої електропровідності при профільних дослідженнях (Бурахович і др., 2015; Шеремет і др., 2016; Ніколаєв та ін., 2019; Ширков та ін., 2013; Ільєнко та ін., 2019, 2020; Кушнір та ін., 2021; Бурахович та ін., 2022').

Аналіз та інтерпретація тривимірних геоелектричних моделей. Найбільш вживаною програмою моделювання ЕМ полів Землі вважається Mtd3fwd, яка використовується для обчислень електричної і магнітної компонент МТ поля для тривимірних аномальних тіл, що збудені плоскою ЕМ хвилею. Алгоритм 3D-моделювання базується на інтегральній формі рівняння Максвелла для кінцево-різницевої апроксимації магнітного поля другого порядку. При моделюванні точність розрахунку компонент ЕМ поля становить 0,001 %.

Основними елементами методики моделювання можна вважати: задані значення питомого електричного опору "нормального" горизонтально-шаруватого розрізу надр, на фоні яких будуються об'ємні неоднорідності; періоди геомагнітних варіацій, для яких розраховано модель; апріорно заданий розподіл ρ приповерхневого провідного шару; неоднорідний глибинний регіональний розподіл ρ та ін.

Методика 3D-моделювання насамперед потребує підбору МВП параметрів, а потім уточнення отриманої моделі за даними МТЗ. Це відповідає тому, що спочатку ми досліджуємо моду електромагнітного процесу, яка формується за результатом індукції у провідниках та пов'язана з концентрацією струмів в аномальних зонах низького ρ . Аномальні поля геомагнітних варіацій суттєво залежать і від розподілу ρ вмісного середовища, отже, від електропровідності на великих глибинах. Індукційна мода принципово відрізняється від гальванічної тим, що вона слабо реагує на зміни ρ порід із високим опором. Прийняте значення цього параметру до глибини 160 км становить 1000 Ом·м і розглядається як значення, яке умовно характеризує ізолятор.

Найдоступнішим способом оцінки параметрів середовища була та залишається 1D-інверсія геоелектричних даних. Найбільш повний за глибиною геоелектричний розріз можна отримати з 1D-інверсії узагальнених кривих ρ_n , побудованих шляхом поєднання з кривими магнітоваріаційного зондування (МВЗ) на опорній геомагнітній обсерваторії (Львова, Києва, Одеси, Корця та Яструбівки (Крим)) з кривою ГМТЗ досліджуваного регіону (Kushnir et al., 2021). За даними МВЗ ρ_n змінюється від декількох сотень Ом·м у верхній мантії до менш ніж 0,1 Ом·м для глибини від 700 до 2000 км у нижній. Верхня мантія під Передкарпатським прогином, Причорноморською западиною і СГ значно більш провідна, ніж під УЩ. Водночас дані якісно узгоджуються з "нормальними" розрізами до глибини приблизно 700 км.

Зазвичай розраховується велика кількість моделей з різними варіантами як просторових параметрів аномальних структур, так і значень ρ у земній корі та верхній мантії. Спеціально розглядаються альтернативні моделі.

Підбір розподілу ρ вважається завершеним, коли розраховані модельні ЕМ параметри задовольняють експериментальним даним, наприклад: по-перше, похибка типперів становить близько 10–20 % за модулем та до 20° за напрямком; по-друге, у переважній більшості зберігається співвідношення кривих ρ_n за поляризаціями; по-третє, для більшості експериментальних пунктів підбирались максимально наближена форма та рівень за ρ_n вздовж профілів для різних періодів (похибка спостережених та модельних даних становить від кількох до 30 %); у межах планшету суттєва похибка допускається у майже 10 % пунктів кривих МТЗ. Останнім етапом побудови геоелектричної моделі можна вважати її інтерпретацію з метою отримання фізико-геологічного тлумачення для застосування в таких важливих областях як вивчення перспектив пошуку рудопроїв корисних копалин, нафтогазоносності та сейсмічної небезпеки.

На сьогодні з використанням сучасного польового матеріалу побудовано тривимірні моделі різних геолого-тектонічних регіонів території України. До регіональних можна віднести геоелектричну модель земної кори та верхньої мантії УЩ (Бурахович *и др.*, 2015) та його оточення, яка поділена на три частини: Чернівецько-Коростенська аномалія електропровідності (АЕ) у Подільському і Росинському мегаблоках, Кіровоградська АЕ в Інгульському мегаблоці та Інгулецько-Криворізьській шовній зоні (ІКШЗ), західна частина Приазовського мегаблока, а також моделі північної Добруджі та ПП (Старостенко *и др.*, 2013), Кримсько-Чорноморського регіону (Кушнір та Бурахович, 2021; Бурахович *та ін.*, 2021). Локальні моделі пов'язані з конкретними структурами, Кіровоградського рудного поля (КРР) (Николаев *и др.*, 2013), Голованівської шовної зони (ГШЗ) (Ширков та Бурахович, 2017; Бурахович *та ін.*, 2015), унікальних метабазитових утворень (Тарасівської та Троянківської структур ГШЗ) (Кушнір *та ін.*, 2019), сейсмонезбезпечних ділянок – Могилів-Подільської та Новомиргородської (Кушнір *и Бурахович*, 2012), центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів УЩ (Бурахович *та ін.*, 2022²), та о. Зміїний (Burakhovich *et al.*, 2015).

Основний результат геоелектричних досліджень території України полягає в тому, що спостерігається особливе природне явище – висока електропровідність, яка концентрується в окремих ділянках земної кори і верхньої мантії і формує зони різної інтенсивності і глибини залягання. Ці зони по-різному характеризують геологічні регіони.

УЩ. Існуюча на сьогодні регіональна тривимірна геоелектрична модель західної частини УЩ (Волинський, Подільський, Росинський, Бузький мегаблоки) підтвердила складну неоднорідну будову надр. На північному заході УЩ на границі Волинського та Росинського мегаблоків в земній корі на глибині між 15 та 30 км розташована Коростенська АЕ. Середнє значення ρ дорівнює 30 Ом·м. Просторово ця структура збігається з Коростенським плутоном. На заході УЩ у тому ж інтервалі глибин (h) виявлено Чернівецько-Коростенську АЕ, що характеризується великою площею та складною будовою. Частина аномалії з $\rho=5$ Ом·м розташована в межах Росинського та Подільського мегаблоків h від 15 до 30 км і містить об'єкт високого $\rho \approx 1000$ Ом·м. Західна частина цієї структури, що має середній $\rho \approx 20$ Ом·м, виходить за межі УЩ і простягається в двох напрямках – на південь та південний схід уздовж Подільської ЗР до ГШЗ. Зони глибинних розломів (ЗР): Ольшанського, Великоречицького (продовження Ольшанського), Брусилівського, Погребищенського, Віленського і Кочерівського проявилися в АЕ.

Загалом регіону притаманна висока електропровідність і на астеносферних глибинах від 50–70 до 125 км з $\rho \approx 25$ –50 Ом·м. У південно-західній частині УЩ виявлено провідник з верхньою кромкою на глибині 50–70 км, який диференційовано за ρ від 48°00' пн.ш.: на північ до 50°00' пн.ш. (південь Росинсько-Бузького мегаблока УЩ) $\rho=50$ Ом·м, на південь (схил УЩ і частково Причорноморська западина) $\rho=25$ Ом·м. Відкориговано межі мантийного провідника. На сході він трасується частково за Тальнівською і Одеською ЗР, на півночі поступово зміщується вздовж Хмельницької ЗР, де далі йде субширотно і відповідає уступу поверхні Мохо. На півдні проходить по Кишинівській ЗР на широті південної границі УЩ, на заході занурюється до глибини 90–100 км.

Аналіз детальної 3D-моделі центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР заходу УЩ показав, що з великої кількості приповерхневих аномалій і низьким ρ від 5 до 100 Ом·м більшість занурюється до 500 м, і тільки декілька перетинають глибину 1 км та простежуються до 11 км. Встановлено, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської, Немирівської ЗР, Самгородського розлому та Кочерівського синклінію. Підтверджено та деталізовано регіональні АЕ як у глибинній частині земної кори, так і у верхній мантії, частина Звіздаль-Заліської ЗР проявилася на глибинах 15–30 км як зона контакту аномальних високого та низького ρ . АЕ приурочені до видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітизованих порід, частина поверхневих АЕ відповідає областям кори вивітрювання. Більшість АЕ збігається з рудопроявами, рудоносними полями і родовищами корисних копалин.

Центральна частина УЩ об'єднує із заходу на схід – ГШЗ, Інгульський мегаблок та ІКШЗ, відрізняється високою електропровідністю по всьому розрізу земної кори, і це свідчить як про аномально високу проникність порід палеопротерозойського блока, так і про сучасні прояви активізації. Розрахунки геоелектричної 3D-моделі дозволили виявити різну просторову орієнтацію течій телуричних струмів у центральній частині УЩ – субширотну та субмеридіональну, що відповідає поверхневим та глибинним АЕ.

На фоні "нормального" розподілу поверхневих відкладень у ГШЗ виявлено дві аномалії із субширотною орієнтацією у просторі у самій верхній (до 100 м) частині розрізу, одна з яких може бути південно-західним продовженням Суботсько-Мошорської ЗР. Південніше за 48°00' пн.ш. розташована система провідників субмеридіонального простягання, яка збігається з частинами Ємилівської, Первомайської та Звенигородсько-Братської, Західно-інгулецької та Криворізько-Кременчуцької ЗР.

У межах КРР та ГШЗ виділяється розгалужена мережа провідників з низьким $\rho=50$ Ом·м на h від 100 м до 2,5 км, які приурочені до окремих частин Звенигородсько-Братської-Мошоринської, Ємилівської, Лелеківської, Конкської, Ємилівської, Тальнівської, Первомайської та Кіровоградської ЗР. На цих глибинах простежуються провідники ($\rho=10$ Ом·м) Західноінгулецької (між Чигиринським та Долинським масивами гранітоїдів) та Криворізько-Кременчуцької ЗР.

На глибинах 5–10 і більше км АЕ (навіть якщо вони просторово і збігаються з розташуванням глибинних ЗР) із субвертикальних із збільшенням глибини перетворюються на субгоризонтальні провідні структури (шари). Показним виятком на h від 5 до 20 км є провідник розміром 5 км×45 км, розташований у центральній частині Новоукраїнського масиву. А також ділянка перетину

Первомайської з Тальнівською ЗР в h 10–20 км та, можливо, східне продовження Суботсько-Мошоринської ЗР у межах ІКШЗ та північної частини Криворізько-Кременчуцької ЗР на глибинах від 10 до 30 км. Глибинна АЕ (10 км) у вигляді складної субширотної зони у надрах південного схилу УЩ виділяється в районі збіжності основних ЗР Первомайського, Кіровоградського, Західноінгульського та Криворізько-Кременчуцького. Окремою провідною субмеридіональною структурою південніше $48^{\circ}00'$ пн.ш. проявляється Тальнівська ЗР. Результати тривимірного моделювання базит-метабазитових структур Ятранського блока ГШЗ – Тарасівської та Троянківської, показали, що такі структури у геологічних межах в АЕ не проявилися. Але ЗР, що оконтурюють та перетинають їх, виявилися складними аномальними об'єктами як у плані, так і за глибиною. У геоелектричному відношенні струмові структури двох масивів суттєво відрізняються. Так, Тарасівську структуру субширотно перетинають АЕ з різним ρ , що виділені на трьох h : 0–100 м з ($\rho=10$ –250 Ом·м); 2–7 та 7–10 км з ($\rho=10$ –250 Ом·м). АЕ Троянківського масиву проявилися на чотирьох h : 0–100 та 150–200 м з ($\rho=5$ –100 Ом·м); 2–4 та 4–10 км з ($\rho=50$ –250 Ом·м). Об'єднуючою рисою двох структур є прояв низьких значень ρ від 5 до 100 Ом·м саме у їх геологічних межах.

Західна границя регіональної Кіровоградської АЕ (h від 20 до 25 км з $\rho=10$ –50 Ом·м) розташована у зоні давнього шва Херсон–Смоленськ, тоді як в h 25–30 км із $\rho=50$ Ом·м відповідає Кіровоградській глибинній ЗР, сама ж аномалія охоплює територію, що включає ІКШЗ, і являє собою витягнуту з півдня на північний схід структуру з просторовими розмірами від 50 до кількох сотень км і тільки на півдні УЩ змінює своє простягання на субширотноє вздовж Конської ЗР.

Експериментальні дослідження та результат тривимірного моделювання свідчать про те, що напевно чи існує єдиний провідник у верхній мантії в центральній частині УЩ. Швидше за все, можна припустити існування декількох локальних неоднорідностей: біля м. Кропивницький, у зоні перетину Кіровоградської та Суботсько-Мошоринської ЗР, виділяється провідник субмеридіонального простягання; дві субширотні високопровідні зони фрагментарно проявляються вздовж трансекту Херсон–Смоленськ. До речі, над першою ділянкою в земній корі виділено провідник h 5–20 км з 10 Ом·м. Розміри цих зон у широтному напрямку майже такі ж, як і ширина Новоукраїнського масиву. Через відсутність експериментальних спостережень в області великих періодів, на жаль, важко встановити, чи існують на північ уздовж шва Херсон–Смоленськ такі ж ізольовані високопровідні тіла у верхній мантії. Більш вірогідно астеносфера на глибинах від 50 км до 120 км отримана в південній частині Інгульського мегаблока. Його північна границя має проходити південніше $47^{\circ}20'$ пн.ш. На схід від $32^{\circ}00'$ сх.д. вона сягає $47^{\circ}40'$ пн.ш. Максимальне поширення на північ спостерігається вздовж Кіровоградської АЕ, і приурочена вона до віялоподібнозбіжних ЗР – Західноінгульського, Кіровоградського, трансрегіонального шва Херсон–Смоленськ та Первомайського.

Природа АЕ на глибині до 2,5 км зумовлена наявністю асоціації електропровідних мінералів (сульфідів, графіту) у зонах метасоматичної переробки порід, що ведуть до утворення рудної мінералізації (уран, золото, рідкісні метали). АЕ у земній корі на h 5–30 км і верхньої мантії 50–120 км, наймовірніше, відображають сліди впливу мантійних флюїдів. Дедалі частіше, за останніми даними, природу аномалій розглядають як

результат спільної діяльності електронного та іонного типів електропровідності.

Східна, в геоелектричному сенсі, частина УЩ – це Середньопридніпровський та Приазовський мегаблоки з ОПШЗ. Архейський Середньопридніпровський мегаблок, не порушений процесами протерозойської тектономагматичної активізації, характеризується аномально високим ρ . 3D-модель вирізняється як зонами аномально високого ρ (північна частина Західноприазовського мегаблока – Вовчанський блок), так і аномально низького. Так у напрямку із заходу на схід найінтенсивніші АЕ: в районі ОПШЗ, Гуляйпільського та Андріївського блоків Західного Приазов'я, Центрального Приазов'я (h від поверхні до 2 км, $\rho \approx 10$ Ом·м у районі Азово-Павлоградської та Центральноприазовської ЗР і південної частини Андріївського блока; h від 2 до 10 км, $\rho=100$ Ом·м у районі Гуляйпільського, Андріївського блоків та ОПШЗ) та третя глибинна (h 10–50 км) низькоомна ($\rho \approx 100$ Ом·м) ділянка розташована біля межі Східного Приазов'я зі СП у районі Грузько-Єланчикської ЗР. За даними сейсмотомографії, у досліджуваному регіоні виділяються зони розшарування і, отже, області підвищеної проникності.

Кримсько-Чорноморський регіон. Уперше для Криму та прилеглих територій побудовано тривимірну геоелектричну модель земної кори та верхньої мантії за результатами експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, які було проведено у 2008–2013 рр. Інститутами Національної академії наук України (*Кушнір та Бурахович, 2021; Бурахович та ін., 2021*). Основним результатом аналізу отриманої моделі розподілу ρ є виявлення областей АЕ як у земній корі, так і у верхній мантії, які характеризуються різною провідністю і глибиною залягання, конфігурацією і по-різному характеризують геологічні структури.

Субвертикальні електропровідні зони чи контакти різного ρ переважно в приповерхневих шарах збігаються з розломними структурами, більшість таких об'єктів приурочено до границь між різними тектонічними елементами, такими як – СП і Гірський Крим, Північнокерченська і Південнокерченська зони та іншими розломами: Чонгарським, Мелітопольсько-Новоцаринським, Корсарсько-Феодосійським, Горностаєвським та Керченсько-Чкалівським. Як окрема потужна АЕ проявилася система розломів Миколаївського та Західнокримського. Глибше в земній корі та верхній мантії геоелектричні неоднорідності, навіть якщо їх межі просторово і збігаються з розташуванням глибинних ЗР, перетворюються в субгоризонтальні структури (шари) та проявляються в регіональних АЕ. Неоднорідність корових та мантійних високопровідних шарів може свідчити про високу проникність для глибинних флюїдів зон контактів.

Впевнено простежується глибинна субширотної структура в земній корі, яка на заході підтверджує та деталізує відому Тарханкутську АЕ, та продовжується через центральний Крим до північно-західної частини Керченського півострова. Припускається наявність у надрах північно-західного шельфу Чорного моря та в північно-східній частині Керченсько-Таманського прогину потужної субширотної аномалії на межі кора–верхня мантія, що оконтурює Кримський півострів. На південному сході виразно проявилася ізометрична АЕ у зоні нафтового родовища Субботіна. На жаль, остаточний варіант розташування північної границі геоелектричної астеносфери на глибинах 110–140 км, за існуючими на сьогодні експериментальними ЕМ спостереженнями, вибрати складно,

передбачаємо, що вона проходить в осьовій частині грабенів у зоні зчленування різновікових платформ.

Розглянутий матеріал впевнено свідчить про приуроченість проявів вуглеводнів до виділених за даними геоелектромагнітного зондування та тривимірного моделювання АЕ, які характеризуються субвертикальними каналами, що гальванічно пов'язані з осадовими відкладами або субвертикальними контактними зонами різного опору, що спостерігаються не тільки в земній корі, але і в шарах у верхній мантії (60–90 км, 110–140 км) та можуть зумовлювати надходження надглибоких флюїдів. Геоелектричні неоднорідності у земній корі та верхній мантії так чи інакше, але підтверджуються наявністю різних аномалій в інших геофізичних полях. Так, за результатами томографічного моделювання виділено зону низьких швидкостей, що інтерпретується як ослаблена ділянка в корі (Старостенко, Гинтов, 2018). Інтенсивні аномалії теплових потоків (Кутас, 2020) погоджуються з утворенням локальних вогнищ розтягання. Параметри співвідношень ізотопів $^3\text{He}/^4\text{He}$ свідчать про аномальність цього регіону. Передбачається, що шляхи проникнення мантійного гелію утворились у результаті молодшої активізації (Гордиенко, 2001). Загальне поглиблення на південь верхньої кромки субширотних ланцюгів АЕ відповідає сейсмоструктурній моделі, яка також характеризується нахилом ізоліній швидкостей пружних хвиль у південному напрямку, що узгоджується з нахилом шарів земної кори в моделі DOBRE-5 (Starostenko et al., 2015) на тих же глибинах.

Поза всяким сумнівом існує взаємозв'язок між проявами сейсмічності, нафтогазоносністю і геоелектричними неоднорідностями, які відображають сучасний стан земної кори і верхньої мантії та, ймовірно, сліди впливу мантійних флюїдів. Зони проявів надглибоких флюїдів, отримані за даними сейсмотомографії, аномалій високої електропровідності в земній корі і верхній мантії, підвищеного теплового потоку і поширення гіпоцентрів землетрусів, підтверджують зв'язок сейсмічності Криму з колізійними процесами (Старостенко, Гинтов, 2018).

ПП та Північна Добруджа. Витягнуті на сотні кілометрів провідники приурочені до глибинних розломів різного рангу та їх перетинів: у центральній частині ПП, крайового шва Кагульсько-Ізмаїлівського з Фрунзенським, Болградського, Чадир-Лунгського, частини Саратського та ін. Основний глибинний провідник складної конфігурації у земній корі та у верхній частині верхньої мантії приурочений до Кілійської зони південного борта ПП. Північний борт характеризується локальною провідною структурою в земній корі на зламі Чадир-Лунгського розлому. Північна границя провідного шару у верхній мантії розташована між Чадир-Лунгським і Болградським розломами та простягається у субширотному напрямку в акваторії Чорного моря. На глибині 20–100 км у моделі о. Зміїний виявлено субширотний провідник з $\rho=25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. АЕ займає положення між розломами: регіональним Печеніга–Камена, який, можливо, є продовженням у Чорному морі лінеамента Тейсейра–Торнквіста, на півдні і Кілійським на півночі. Можливо його гальванічне з'єднання з подібними зонами зниженого опору ПП на заході, а також з Тарханкутською АЕ і на сході (Burakhovich et al., 2015).

Підвищений тепловий потік, АЕ у верхній мантії і на різних глибинах у земній корі, позитивна мантійна аномалія гравітаційного поля, підняття покрівлі нижньої мантії, присутність низькошвидкісної області, що поширюється вгору від нижньої мантії, через зону розділу і середню мантію до перехідної зони верхньої мантії, прояви у верхній мантії субвертикальної мантійної

колонки, як наслідків глибинного флюїду, можна пояснити проявом мантійного плюму і пов'язаних з ним флюїдів (Старостенко і др., 2013).

Сучасні геоелектромагнітні дослідження. За результатами сучасних синхронних геоелектромагнітних досліджень отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій і електричного поля на поверхні Землі та розуміння геоелектричної структури розрізу окремих районів Карпатського регіону та ДДЗ.

Південний захід Українських Карпат. Намічені в результаті якісної інтерпретації АЕ у земній корі (Кушнір та ін., 2021, Бурахович та ін., 2022') відповідають розломній тектоніці та створюють ланцюг із чотирьох локальних різноорієнтованих ділянок, загальна вісь яких проходить поміж Закарпатським та Чорногоровським глибинними розломами, а в південній частині поміж останнім та Ужоським (можливо також розглядати варіант єдиної повздовжньо-неоднорідної електропровідної структури в межах уявлення про осьову зону Карпатської магнітоваріаційної аномалії). Неоднорідний розподіл електропровідності на глибинах верхньої мантії зафіксовано в регіоні Українських Карпат від Закарпатського прогину до Скибових покривів. Показано, що спостерігається загальне поглиблення верхньої кромки на північний схід від 40–60 км (Закарпатський прогин) до 90–100 км (Кросненського покриву) та різке поглиблення вздовж Поркулецького й Дуклянського покривів. Уздовж простягання внутрішньої і центральної зон Зовнішніх Карпат виділено три ділянки: північна характеризується поглибленням верхньої кромки та розгалуженням електропровідності за глибиною в напрямку на південь; центральна представлена неоднорідним коро-мантійним шаром; південна вирізняється впровадженням з півдня або майже вертикальним проникненням з 60 до 110 км. Отримані результати геоелектромагнітних досліджень добре збігаються з геотермічним районуванням, відповідають структурі літосфери за профілями ГСЗ та уявленням про сучасний геодинамічний розвиток надр.

ДДЗ. Насамперед це структура з поверхневими горизонтами, що характеризуються високою електропровідністю і суттєвою латеральною неоднорідністю.

Брагінсько-Лоевський виступ і Чернігівський блок. Результати якісної інтерпретації свідчать про наявність декількох АЕ, що відповідають як глибинним об'єктам (наприклад, східному закінченню Прип'ятської АЕ), так і неглибоким у верхній частині фундаменту (3–5 км), витягнутим уздовж вісі Чернігівського блока і близько 8 км на його південному борту. Як відомо, природа АЕ зумовлена взаємодією різноманітних геолого-геофізичних факторів. Найзначущими серед них є температура, наявність електрон провідних мінералів та флюїдів. АЕ Прип'ятського прогину, ймовірно, пов'язана із зонами можливого часткового плавлення у земній корі та верхній мантії, тому висунуто припущення саме про її флюїдний механізм (Белявський і др., 2001). Поклади нафти і газу тут пов'язують з палеозойським осадовим чохлам і докембрійським фундаментом. Тоді як Чернігівський блок ДДВ не розглядається як перспективний на нафтогазоносність, незважаючи на те, що тут виділено дві площі – Талалаївську і Никонівську. Їх надра характеризуються перетином активізованих розломів різної орієнтації, а також аномальною потужністю коромантійної суміші і розущільнених областей на поверхні фундаменту і на глибині 20–30 км, що підтверджується результатом якісної інтерпретації експериментальних даних МТЗ та МВП.

Північний борт Белгородсько-Сумського мегаблока. Частотні залежності передавальних операторів

МТ/МВ-методів, а саме мінімум на низхідній гілці кривих ρ_n у діапазоні періодів 600–3000 с, аномальність (вище 1,5) по компоненті M_{yy} горизонтального магнітного тензора, північно-східна орієнтація комплексного індукційного типпера з величиною, меншою за 0,2, практично у всьому частотному діапазоні відповідають провіднику на глибині близько 50–150 км. Аналіз теоретичних і експериментальних даних індукційних параметрів, отриманих при побудові тривимірної моделі Кіровоградської АЕ на $T=2000$ с, показав, що на глибині 50–160 км у верхах магніти спостерігається зниження ρ . Цей район також характеризується неоднорідним розподілом швидкості поширення поздовжніх сейсмічних хвиль.

Південний борт центральної частини ДДЗ. При дослідженні глибинної будови центральної частини південного борту ДДЗ, де Кіровоградська АЕ перетинає Лохвицький та Полтавський блоки, крім присутності поверхневого провідника, який простягається з північного заходу на південний схід та пов'язаний з поверхневою провідністю осадової товщі, просторово деталізована неоднорідність, що передбачається в глибинних горизонтах з верхньою кромкою на 20–30 км у середній частині профілю Несено–Іржавець–Абрамівка і відповідає АЕ.

Згідно з результатами 3D геоелектричного моделювання центральної частини УЩ саме на цих глибинах знайдено аномальні структури, які підтверджуються новими експериментальними МТ/МВ спостереженнями. Крім того, можлива деталізація раніше виділених нафтогазоносних ділянок, а саме перспективної Глидинцівської площі у фундаменті ДДЗ. Профіль досліджень проходить за її межами, на експериментальних даних є інформація про існування глибинного провідника, але підтвердити його наявність і параметри можна тільки в результаті подальшого моделювання. Також інформацію про існування іншого провідника, виділеного за результатами МТЗ на глибині 10–35 км, і про передбачуване за новими даними занурення його верхньої кромки до 20–30 км у південно-західному напрямку, можна підтвердити тільки тривимірним геоелектричним моделюванням. Виділена в даній роботі аномальна область частково збігається з перспективною Підгородською площею (Шеремет і др., 2016, с. 62).

Природа аномалії електропровідності, з одного боку, може бути пов'язана з тріщинуватими породами, за якими мігрують флюїди і утворюють родовища вуглеводнів, або, з іншого боку, пояснюється як результат "вуглеводневого дихання Землі" (Шеремет і др., 2016). Передбачається, що рідкі та газоподібні вуглеводні в осадову товщу могли постачатися з кореневого провідника графітової природи, що залягає в кристалічному фундаменті. Його просторове положення збігається зі скупченнями нафти в осадовому чохла, що їх перекриває. Однією із структур УЩ, з якою пов'язане просторове розташування графітізованих ділянок у породах фундаменту, є Криворізько-Кременчузька ЗР, яка проявляється в геомагнітних варіаціях Кіровоградської АЕ.

Отже, вивчення електромагнітних параметрів і природи аномалій електропровідності в надрах Землі дозволяє, по-перше, визначити сліди проходження глибинних флюїдів, по-друге, намітити взаємодію різних глибинних горизонтів і виявити перспективні на нафтогазоносність ділянки земної кори.

Висновки. Комплексування МТЗ і ГМТЗ з АМТЗ створює нову технологію застосування ЕМ методів, що дозволяє вивчати геоелектричний розріз від перших метрів до сотень км і виконувати тривимірні побудови. При цьому доцільно будувати єдину початкову геоелектричну модель, яка одночасно відповідає узагальненим

кривій ЕМ зондування. Її бажано поєднувати з кривими МВЗ на опорних пунктах (на жаль, таких спостережень на території України всього чотири, і цього недостатньо для адекватного відображення глибинної будови окремих геолого-тектонічних одиниць). МТЗ і ГМТЗ відображають інформацію про глибинний геологічний розріз, тоді як АМТЗ – про приповерхневий. Відсутність чи ігнорування даних про розподіл електропровідності у верхній частині розрізу веде до втрати інформації щодо глибинних неоднорідностей, оскільки неминуче погіршується надійність геоелектричних побудов при інтерпретації даних МТЗ та ГМТЗ.

Бажання будувати якомога більш детальну верхню частину розрізу призводить до необхідності обробляти значні масиви польової інформації методом АМТЗ. Це, у свою чергу, призводить до необхідності формалізувати процес обробки та 1D-інверсії. Рішення відповідних задач із застосуванням саме 3D-моделювання експериментальних даних заповнює порожнечу, яка пов'язана з втратою інформації при формальній побудові синтетичного двовимірного або квазі-3D розрізу як узагальнених одновимірних.

Тому перспективний розвиток глибинної геоелектрики в Україні необхідно розглядати у зв'язку із застосуванням не тільки різних модифікацій ЕМ спостережень поля у широкому діапазоні періодів, але й удосконаленням синхронних площадних систем збору даних, які майже відсутні нині.

Результати проведених МТ досліджень показали, що для побудови більш детальної локальних геоелектричних моделей, які відображають тектоніку і геодинаміку регіонів та можуть застосовуватись при пошуках рудопорояв корисних копалин, у тому числі вуглеводнів, необхідно провести не тільки додаткові експериментальні спостереження, але і більш детальні побудови моделей у масштабі 1:100000 на відміну від регіональних (масштабом 1:2500000 або 1:1000000), які маємо на сьогодні. Сучасні геоелектричні дослідження, проведені авторами в різних частинах ДДЗ, Карпатському регіоні та локальних ділянках УЩ, Переддобрудзького прогину, свідчать про необхідність продовження такої роботи.

Сьогодні проблема пошуків скупчень природного водню та організації його видобутку є досить актуальною у зв'язку з наміром світової спільноти перейти у найближчій перспективі на безвуглецеву енергетику, в якій важливе місце приділяється водню – екологічно чистому паливу майбутнього. За результатами сейсмотомографії (Цветкова і др., 2017) присутність похилих шарів у мантиї, а також поширення шару перехідної зони верхньої мантиї від південних структур (з боку Чорного моря) на північ дозволяє стверджувати про активізацію мантиї під Південноукраїнською монокліналою та південною окраїною УЩ. Зроблено висновок, що саме Північноазовський та Волино-Оршанський пліюми можуть бути основними джерелами водню. Ці території також можна вважати перспективними щодо подальших глибинних геоелектричних досліджень.

Окремим питанням постає дослідження ймовірної природи аномалій високої електропровідності в земній корі та верхній мантиї, їх зв'язок з геодинамічними проявами та родовищами і рудопроявами корисних копалин, зокрема і горючих. Вирішення цієї задачі має значення при побудові глибинних геологічних і геотектонічних моделей, прогнозних металогенічних карт і схем, розробці критеріїв виділення перспективних площ на виявлення нових рудних та вуглеводневих проявів корисних копалин, а також для пояснення сучасних геодинамічних процесів.

Список використаних джерел

- Белявський, В.В., Бурахович, Т.К., Кулик С.Н., Сухой, В.В. (2001). Электромагнитные методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. К.: Знання.
- Бурахович, Т.К., Ганієв, О.З., Ширков, Б.І. (2015). Моделювання глибинної будови Голованівської шовної зони за даними геоелектрики. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(69), 52–59.
- Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Шеремет, Е.М., Ширков, Б.І. (2015). Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых. *Геофизический журнал*, 37(6), 42–63.
- Бурахович, Т.К., Ширков, Б.І. (2017). Электромагнитные методы при прогнозировании рудопроявлений корисних копалин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(79), 40–45.
- Бурахович, Т.К., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А. (2021). Інтерпретація 3D геоелектричної моделі надр степового Криму. Євпаторійський та Сакський профілі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(95), 34–38.
- Бурахович, Т.К., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А. (2022¹). Сучасні геоелектромагнітні дослідження Українських Карпат. *Геофизический журнал*, 44(3), 21–43.
- Бурахович, Т.К., Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М. (2022²). Тривимірна геоелектрична модель центральної частини Звиздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофизический журнал*, 44(3), 13–33.
- Гордиенко, В.В. (2001) Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. Киев: Знання.
- Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2019). Электромагнитні дослідження Звиздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофизический журнал*, 42(4), 97–113.
- Ільєнко, В., Бурахович, Т.А., Кушнір, Попов, С., Омельчук, О. (2020). МТ/МВ дослідження в зоні ендоконтакту Коринського гранітного масиву. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(88), 46–52.
- Кушнір, А.Н., Бурахович, Т.К. (2012). Аномалии электропроводности и внутриплитовые землетрясения западной части Украинского щита и Волинско-Подольской плиты. *Геофизический журнал*, 34(4), 157–165.
- Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К., Ільєнко, В.А., Николаев, И.Ю., Ширков, Б.І. (2019) Глибинні геоелектричні дослідження Троянківського та Тарасівського метабазитових масивів Голованівської шовної зони. *Геофизический журнал*, 41(6), 56–72.
- Кушнір, А., Бурахович, Т., Ільєнко, В., Ширков, Б. (2021). Сучасні магнітоелектричні дослідження Українських Карпат. *JGD*, 2(31), 92–101.
- Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2021). Геоелектричні неоднорідності Кримського регіону як зони проявів сейсмічності та нафтогазоносності. *Геофизический журнал*, 43(1), 69–92.
- Кутас, Р.І. (2020). Геотектонические и геотермические условия зон флюидной и газовой разгрузки в Черном море. *Геофизический журнал*, 42(5). 16–52.
- Николаев, И.Ю., Бурахович, Т.К., Шеремет, Е.М. (2013). Объемная геоэлектрическая модель Кировоградского рудного района центральной части Украинского щита. *Геофизический журнал*, 35(4), 127–139.
- Николаев, И.Ю., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А., Николаев, Ю.І. (2019). Электромагнитні дослідження західної частини Українського щита. *Геофизический журнал*, 41(3), 120–133.
- Старостенко, В.І., Гинтов, О.Б. (Ред.). (2018). Очерки геодинамики Украины. Киев: ТОВ "ПІДПРИЄМСТВО «ВІН ЕН ЕЙ»".
- Старостенко, В.І., Бурахович, Т.К., Кушнір, А.Н., Легостаева, О.В., Цветкова, Т.А., Шеремет, Е.М., & Шумлянская, Л.А. (2013). Возможная природа сейсмической активности недр Добруджского прогиба и Северной Добруджи. *Геофизический журнал*, 35(1), 61–74.
- Цветкова, Т.А., Бугаєнко І.В., Заец Л.Н. (2017). Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофизический журнал*, 39(4), 42–54.
- Шеремет, Е.М., Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Дудик, А.М., Дудик, К.А., Кушнір, А.Н., Ширков, Б.І., Сетая, Л.Д., Агаркова, Н.Г. (2016). Геоэлектрические и геохимические исследования при прогнозировании углеводородов в Украине. Под ред. акад. НАН Украины А.Н. Пономаренко. Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семененко НАН Украины. К.: ЦП "Компринт".
- Ширков, Б.І., Бурахович, Т.К., Кушнір, А.Н., Зайцев, Г.М. (2013). Аномальна електропровідність земної кори східної частини Приазовського мегаблока. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 60, 12–16.
- Шуман, В.Н., Савин, М.Г. (2011). Математические модели геоэлектрики. Киев: Наукова думка.
- Шуман, В.Н. (2012). Современные электромагнитные зондирующие системы: состояние, тенденции развития, новые идеи и задачи. *Геофизический журнал*, 34(4), 282–291.
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.N., Nikolaev, I.Yu., Shirkov, B.I. (2015). The 3D geoelectrical model of Earth crust and the upper mantle of the Dobrudzha region. *Геодинаміка*, 18(1), 55–62.
- Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Khazan, Ya.M. (2001). Electrical conductivity anomalies in the crust and upper mantle of Ukraine. *Acta Geoph. Polonica*, 50(4), 547–565.
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space*, 51, 1127–1133.
- Kushnir, A., Burakhovich, T., Ilyenko, V., Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *XXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*. May 2021, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116>
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfaliuk, L., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406–428.

References

- Belyavskiy, V.V., Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Sukhoy, V.V. (2001). Electromagnetic methods in the study of the Ukrainian Shield and the Dnieper-Donets Basin. Kyiv: Znannya. [in Russian]
- Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Burakhovich, T., Ganiev, O., Shirkov, B. (2015). Deep structure modeling of Golovanivsk suture zone on the basis of geoelectric data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(69), 52–59. [in Ukraine]
- Burakhovich, T., Kushnir, A., Ilyenko, V. (2021). Interpretation of the 3D geoelectrical model of the steppe Crimea bowels. Eupatoria and Saki profiles. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(95), 34–38. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.04> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Ilyenko, V.A., Kushnir, A.M., (2022²). Three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskij zhurnal*, 44(3), 13–33. DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.272325> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Kulik, S.N., Khazan, Ya.M. (2001). Electrical conductivity anomalies in the crust and upper mantle of Ukraine. *Acta Geoph. Polonica*, 50(4), 547–565.
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., Ilyenko, V.A. (2022¹). Modern geoelectromagnetic researches of the Ukrainian Carpathians. *Geofizicheskij zhurnal*, 44(3), 21–43. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i3.261966> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., Shirkov, B.I. (2015). Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral occurrences. *Geofizicheskij zhurnal*, 37(6), 42–63. [in Russian]
- Burakhovich, T., Shyrkov, B. (2017). Electromagnetic methods for forecasting of mineral resources occurrences. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(79), 40–45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.06> [in Ukraine]
- Burakhovich, T.K., Kushnir, A.N., Nikolaev, I.Yu., Shirkov, B.I. (2015). The 3D geoelectrical model of Earth crust and the upper mantle of the Dobrudzha region. *Geodynamics*, 18(1), 55–62.
- Gordienko, V.V. (2001) Modern activation and helium isotopy of the territory of Ukraine. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Ilyenko, V., Burakhovich, T., Kushnir, A., Popov, S., Omelchuk, O. (2020). Magnetotelluric and magnetovariable researches in the endocontact area of Korinsky granite array. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(88), 46–52. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07> [in Ukraine]
- Ilyenko, V.A., Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K. (2019). Electromagnetic investigations fault zone of Zvizdal-Zalyska and Brusilovska of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskij zhurnal*, 4 (42), 97–113. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v4i4.2019.177370> [in Ukraine]
- Ingerov, A.I., Rokityansky, I.I., Tregubenko, V.I. (1999). Forty years of MTS studies in the Ukraine. *Earth Planets Space*, 51, 1127–1133.
- Kushnir, A., Burakhovich, T., Ilyenko, V., Shyrkov, B. (2021). Geoelectrical properties of earth's crust and upper mantle rocks according to the 1D inversion results of DMTS curves. *XXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*. May 2021, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521116>
- Kushnir, A., Burakhovich, T., Ilyenko, V., & Shyrkov, B. (2021). Modern magnetotelluric researches of the Ukrainian Carpathians. *JGD*, 2(3), 92–101. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.092> [in Ukraine]
- Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K. (2021). Geoelectrical inhomogeneities of the Crimean region as the seismicity and oil-gas potential zones. *Geofizicheskij zhurnal*, 43(1), 69–92. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225494> [in Ukraine]
- Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K., Ilyenko, V.A., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M. (2019). Deep geoelectric studies of the Trojanyk and Tarasivka metabasite massifs of the Golovaniv suture zone. *Geofizicheskij zhurnal*, 41(6), 56–72. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190066> [in Ukraine]
- Kushnir, A.N., Burakhovich, T.K. (2012). Electrical conductivity anomalies and intraplate earthquakes in the western part of the Ukrainian Shield and Volyn-Podolsk plate. *Geofizicheskij zhurnal*, 34(4), 157–165. [in Russian]
- Kutas, R.I. (2021). Geotectonic and geothermal conditions of the gas discharge zones in the Black Sea. *Geofizicheskij zhurnal*, 42(5). 16–52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215070> [in Russian]
- Nikolaev, I.Yu., Burakhovich, T.K., Sheremet, E.M., (2013). Obymnaya geoelektricheskaya model' Kirovogradskogo rudnogo rayona tsentralnoy chasti Ukrainskogo shchita. *Geofizicheskij zhurnal*, 35(4), 127–139. [in Russian].
- Nikolaev, I.Yu., Kushnir, A.M., Ilyenko, V.A., Nikolaev, Yu.I. (2019). Electromagnetic studies of the western part of the Ukrainian shield.

Geofizicheskij zhurnal, 3 (41), 120–133. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433> [in Ukraine]

Sheremet, E.M., Burakhovich, T.K., Dudik, A.M., Nikolaev, I.Yu., Dudik, S.A., Kushnir, A.N., Shirkov, B.I., Setaya, L.D., Agarkova, N.G. (2016). Geoelectric and geo-chemical studies in predicting hydrocarbons in Ukraine. Kiev: Komprint, 489 p. [in Russian]

Shirkov, B.I., Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., Zaitsev, G.M. (2013). Anomalous electrical conductivity of the earth's crust in the eastern part of the Azov megablock. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(60), 12–16. [in Ukraine]

Shuman, V.N. (2012). Modern electromagnetic probing systems: state of the art, development trends, new ideas and tasks. *Geofizicheskij zhurnal*, 34(4), 282–291. [in Russian]

Shuman, V.N., Savyn, M.G. (2011). Mathematical models of geoelectrics. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfaliak, L., Czuba, W., Środa, P., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomyets, K.,

Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., Tolgunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the northwestern Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, 201, 406–428. doi:10.1093/gji/ggv018

Starostenko, V.I., & Gintov, O.B. (Eds.). (2018). Essays on the geodynamics of Ukraine. Kiev. VI EN EY [in Russian]

Starostenko, V.I., Burakhovich, T.K., Kushnir, A.M., Legostaeva, O.V., Tsvetkova, T.O., Sheremet, E.M., Shumlyanskaya, L.A. (2013). The possible nature of the seismic activity of the depths of the Predobudruzhsy trough and the Northern Dobruja. *Geofizicheskij Zhurnal*, 35(1), 61–74. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i1.2013.116331> [in Russian]

Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., Zaets, L.N. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskij Zhurnal*, 39(4), 42–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.1075062017> [in Russian]

Надійшла до редколегії 21.12.22

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

E-mail: burakhovich@ukr.net;

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

E-mail: antonn@ukr.net;

Institute of Geophysics NAS of Ukraine,

32 Palladina Ave., Kiev, 03680, Ukraine

HISTORY, CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS OF GEOELECTROMAGNETIC RESEARCH IN UKRAINE

The current state and prospects for the development of geoelectromagnetic methods are considered. Problems and ways to solve them, new ideas and new tasks are discussed. Modern experimental methods of observations, universal software complexes for their processing, methods of three-dimensional model building of various geological and tectonic units of Ukraine are analyzed. The geological and geophysical interpretation results of regional and local three-dimensional models are shown. Geoelectrical inhomogeneities in the earth's crust and upper mantle of Ukraine, which are characterized by abnormally low and abnormally high values of resistivity, have been revealed. Zones of high conductivity that reach the surface are defined by subvertical heterogeneity and form a galvanically connected system. It spatially correlates with deep faults of various ranks, identified by geological data. The nature of conductivity anomalies at the depth of up to 2.5 km is due to the presence of conductive mineral associations (sulfides, graphite) in the zones of metasomatic processing rocks that lead to the formation of ore mineralization (uranium, gold, rare metals). In the earth's crust at the depths of 5–30 km and the upper mantle of 50–120 km, most likely, traces of the influence of modern mantle fluids are reflected. More and more often, according to the latest data, the nature of anomalies is considered as the result of the joint activity of electronic and ionic conductivity. Conductivity anomalies of the earth's crust and upper mantle indicate possible zones of geodynamic activation, and deep faults are defined by zones of increased permeability through which mantle fluids are unloaded through the lithosphere. In particular, the connection of conductivity anomalies on the territory of Ukraine with the processes of petroleum and ore deposit formation is demonstrated.

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