

Сучасні геоелектромагнітні дослідження Українських Карпат

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

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

Надійшла 15 лютого 2022 р.

За результатами сучасних синхронних геоелектромагнітних досліджень отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій й електричного поля на поверхні Землі та уяву про розподіл електропровідності й геоелектричну структуру розрізу надр південного заходу Українських Карпат. Обробку експериментальних матеріалів проведено за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV, проаналізовано властивості функцій відгуку — типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 5000 с і кривих позірною питомого електричного опору (амплітудні значення та фази імпедансу) від 10 до 10 000 с у різних тектонічних структурах. Намічені в результаті якісної інтерпретації аномалії електропровідності в земній корі створюють ланцюг із чотирьох локальних різноорієнтованих ділянок, загальна вісь яких проходить поміж Закарпатським та Чорноголовським глибинними розломами, а в південній частині поміж останнім та Ужоцьким (можливо також розглядати варіант єдиної поздовжньо-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 Скибового покриву. Показано, що спостерігається загальне поглиблення верхньої кромки аномалії на північний схід від 40—60 (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 аномалії електропровідності за глибиною в напрямку на південь; центральна представлена неоднорідним коромантійним шаром; південна вирізняється проникненням з півдня або майже вертикально з глибини від 60 до 110 км. Отримані результати геоелектромагнітних досліджень добре збігаються та доповнюють геотермічне районування, відповідають структурі літосфери за профілями ГСЗ та уявленню про сучасний геодинамічний розвиток надр.

Ключові слова: південний захід Українських Карпат, глибинне магнітотелуричне зондування, магнітоваріаційне профілювання, аномалії електропровідності.

Вступ. З другої половини минулого століття намітився пік наукових досліджень стосовно глибинної будови літосфери, вивчення принципів закономірностей і складу окремих геоблоків Землі, зон їх зчленування, геодинамічного стану середовища і районування територій за геодинамічною активністю. Були проведені геолого-геофізичні експерименти, комплексна інтерпретація сейсмічних, геоелектричних і потенційних геофізичних методів на територіях, що охоплюють великі геологічні провінції, в то-

му числі щити і давні платформи, молоді плити, складчасті зони та ін.

Геоелектромагнітні експерименти дали змогу виявити глибинні зони високої електропровідності на всіх континентах [Kulík, 2004; Жамалетдинов, Кулик, 2012]. Відомо, що у переважній більшості аномалії — це витягнуті на багато сотень, іноді тисяч кілометрів провідники, тоді як їхня ширина зазвичай не перевищує перших десятків кілометрів. Глибина залягання покривлі змінюється від поверхні до 20—30 км. Висока електро-

провідність спостерігається і на глибинах у верхній мантії. Походження згаданих вище зон може бути результатом геодинамічних процесів у межах областей з різними їх проявами [Киссин, 2001, 2006; Unsworth, 2008; Кушнір, Бурахович, 2019].

Одним з таких унікальних геофізичних явищ є Карпатська магнітоваріаційна аномалія [Wiese, 1965; Rokitiński et al., 1975; Zhdanov et al., 1986; Рокитянский, Ингеро́в, 1999]. Протягом багатьох років від дня виявлення [Wiese, 1965] ця аномалія є базовим об'єктом для відпрацювання методики польових спостережень, обробки та інтерпретації даних магніотелуричного зондування (МТЗ) та магнітоваріаційного профілювання (МВП) вітчизняними та зарубіжними вченими. Найбільш повний огляд раніше виконаних електромагнітних досліджень Карпатського регіону можна знайти в публікації [Бурахович, 2004] і спеціальних розділах монографій [Гордиенко и др., 2011; Сучасна ..., 2015].

Широко відомий за результатами 2D моделювання [Zhdanov et al., 1986] геоелектричний розріз самої аномалії в земній корі містить високопровідну вставку (питомий електричний опір (ρ) — $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) з покрівлею на глибині (H) 13 км, яка оточена областю з $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, потужністю 10 км і областю розміром $90 \text{ км} \times 14 \text{ км}$ під Складчастими Карпатами, що характеризується $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Показано також, що астеносфера поглиблюється (від 70 до 170 км з $\rho = 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) у напрямку від неогенового Паннонського басейну до Східноєвропейської платформи (СЄП).

Проаналізувавши результати численних МТЗ (близько 30 пунктів) за профілем через Українські Карпати і побудувавши 2D модель (рис. 1), автори [Рокитянский, Ингеро́в, 1999; Сучасна ..., 2015] зробили припущення, що глибина залягання шару високої електропровідності, відповідального за створення магнітоваріаційної аномалії, становить $12 \pm 4 \text{ км}$ із сумарною поздовжньою електропровідністю (S) від 2000 до 10 000 См. Передбачається, що на поперечних кривих у зоні електропровідної аномалії можна виявити вплив астеносфери з $S = 1200 \div 5000 \text{ См}$ (Внут-

рішні Карпати) і 500—1000 См (Зовнішні Карпати і СЄП) на глибині 100—200 км. Автори показали, що існують два електричні провідники в земній корі: один занурюється у південно-західному напрямку від провідних осадів до головного провідника на глибині 10—20 км, а інший відповідає Транскарпатському глибинному розлому.

Відмінною рисою сучасних уявлень за результатами квазітривимірного моделювання про цю структуру [Бурахович, 2004] є розрив «провідника» у земній корі Східних і Південних Карпат. Наприклад, Пенінський і Мармароський пояси, а також Флішові Карпати не є безперервною зоною підвищеної електропровідності. За розворотом спостережених векторів індукції аномалія електропровідності Південних Карпат тяжіє до Передкарпатського прогину, тоді як у Західних Карпатах і північній частині Східних Карпат — до карпатського флішу і вулканітів Пенінського поясу та Вигорлат-Гутинської гряди (див. рис. 1). Визначено параметри Карпатської аномалії в корі ($H = 15 \text{ км}$, $S = 20\,000 \text{ См}$) і мантії ($H = 70 \text{ км}$, $S = 6000 \text{ См}$).

Аналіз результатів моделювання 2D і тонкого електропровідного шару [Гордиенко и др., 2011] дав змогу дійти таких висновків: Карпатська аномалія електропровідності виділяється на всіх профілях (PREPAN, Рема-Локачі, геотраверс II, Рахів I, Чернівці) і явно приурочена до Магурського насуву, розташовуючись основною частиною з боку Закарпатського прогину. Геометричні параметри аномалії (H покрівлі 5—10 км, ширина 30—50 км) і її інтегральна провідність $((1-4) \cdot 10^8 \text{ См} \cdot \text{м})$ наведені в межах поширення опору порід менш як $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. У верхній мантії на профілях, де є кондиційні дані МТЗ (профілі PREPAN і геотраверс II), виділено два провідні об'єкти. Один — з боку Паннонського басейну, він не простежується далі межі Закарпатського прогину зі Складчастими Карпатами. Другий — на території Волино-Подільської плити на відстані 60—80 км від північно-східної межі Передкарпатського прогину і простягається вздовж краю Транс'європейської шовної зони з боку СЄП. Глибина покрівлі на обох профілях близько 90 км.

У підсумку сучасні уявлення про існуючий неоднорідний розподіл електропровідності надр Карпатського регіону України дають змогу зрозуміти, що через різну методику польових спостережень та обробки, з появою досконаліших алгоритмів та програмного забезпечення (одновимірне, двовимірне та тривимірне) інтерпретації магнітотелуричних даних, а також різних виконавців, Карпатська аномалія, за загальної подібності її структури, має низку відмінностей. Втім сам факт виявлення областей суттєво високої електропровідності, визначення фізичних і геометричних параметрів та зв'язку з іншими геофізичними і геологічними аномаліями є великим науковим результатом, який може лягти в основу побудови геолого-тектонічних гіпотез та уявлень. Стосовно загальних рис зазначимо, що спостережені експериментальні параметри не пояснюються тільки індукційними ефектами електропровідних осадових утворень; в електромагнітному відношенні земна кора та верхня мантія є частинами складної тривимірної структури; геоелектричні моделі корої електропровідності не завжди відповідають поверхневій геології та ін.

Досліджувана геоелектрична структура є витягнутим провідником у земній корі, параметри якого характеризується суттєвою неоднорідністю вздовж простягання і який змінює свій напрямок у просторі. Звідси виникає необхідність розгляду глибинної будови реальних геологічних структур на основі аналізу чисельного тривимірного моделювання. Крім того, при побудові попередніх моделей залишилися невирішеними багато питань, наприклад: вплив на результати моделювання поверхневих структур, об'ємний розподіл питомого електроопору аномальних тіл та ін. Тому мета статті, яка продовжує серію публікацій експериментальних геофізичних матеріалів [Kushnir et al., 2021a], — вивчення методами зовнішнього змінного низькочастотного природного електромагнітного поля Землі будови Українських Карпат, обробка, аналіз та інтерпретація сучасних магнітотелуричних та магнітоваріаційних (МТ/МВ) досліджень, виявлення на якісному рівні глибинного розпо-

ділу питомого опору в земній корі та верхній мантії, що є основою для побудови тривимірної глибинної моделі.

Сучасні експериментальні дослідження Українських Карпат глибинними електромагнітними методами за 2015 і 2020 рр. Область досліджень (див. рис. 1) характеризується складною природною геоелектричною будовою, з якою пов'язана істотна інтерференція МТ і МВ відгуків від різноспрямованих на різних глибинах струмових систем. Це осадові відклади (їхня електропровідність сягає 1200 См на північному заході та не перевищує 500 См на південному сході Передкарпатського прогину; у межах Складчастих Карпат величина S дорівнює 200 См, причому ізолінії S витягнуті вздовж Карпат; у Закарпатському прогині S різко збільшується до 1500 См [Кравченко, Сапужак, 1989]) та аномальні неоднорідності як земної кори, так і верхньої мантії (див. наприклад: [Zhdanov et al., 1986; Бурахович, 2004; Гордиенко и др., 2011; Сучасна ..., 2015]), які є об'єктами пошуку. Труднощі досліджень посилюються різноманітними за природою і дуже інтенсивними індустриальними регіонально корельованими електромагнітними шумами (завадами), що породжуються електрифікованими залізницями, транс'європейською системою магістральних трубопроводів та ін. У зв'язку з цим було реалізовано передові синхронні методи і технології проведення комплексних МТ/МВ зондувань, що забезпечують суттєве послаблення електромагнітних завад і надійне оцінювання передавальних операторів — МТ імпедансу та МВ типперу з подальшою їх спільною інтерпретацією.

Сучасні синхронні електромагнітні спостереження у 2015 та 2020 рр. проводили за допомогою довгоперіодних цифрових апаратурних комплексів серії LEMI-417 з ферозондовими магнітометрами, що є надзвичайно ефективним при глибинних зондуваннях земної кори і верхньої мантії. Синхронізацію станцій здійснювали за допомогою GPS приймача.

Одинадцять пунктів спостережень розташовані на півночі західної частини Українських Карпат вхрест простягання тектоніч-

них структур — уздовж двох профілів Мукачєво — Сколе та Середнє — Бориня (відстань між пунктами 10—15 км). У межах відомої Карпатської магнітоваріаційної аномалії експериментальні МТ/МВ роботи проведено за профілем Карпатський в кількості 12 пунктів (відстань між пунктами 20—30 км). Спостереження в польових точках велись від 3 до 12 діб. У переважній більшості пунктів отримано кондиційні 5-компонентні записи електромагнітного поля, синхронні з ще однією польовою точкою.

Завдяки сучасному підходу до обробки експериментальних синхронних МТ/МВ досліджень (за допомогою загальноприйнятого в геоелектричній спільноті програмного комплексу PRC_MTMV) були отримані криві позірною питомого опору ($\rho_{\text{п}}$) для широкого діапазону періодів $T = 10 \div 10\,000$ с (амплітудні та фазові), а також типери для $T = 50 \div 5000$ с у різних тектонічних структурах Українських Карпат (рис. 2, 3).

Незважаючи на сучасні підходи до обробки, більшість кривих ГМТЗ отримано зі значним розкидом за $\rho_{\text{п}}$ (подекуди декілька порядків) на $T > 5 \cdot 10^3$ с. Приклади ГМТЗ для різних тектонічних структур показано на рис. 2, повністю експериментальні спостереження ГМТЗ, їх аналіз і результати формальної інтерпретації опубліковані в статті [Kushnir et al., 2021a].

Індукційні параметри (див. рис. 3) будуються більш упевнено, техногенні завади мають значний вплив на періодах до 300 с, подекуди 800 с.

Значні градієнти поверхневої провідності призводять до суттєвих спотворювальних ефектів на криві МТЗ і, отже, до змі-

щення оцінок глибини залягання та провідності глибинних об'єктів при інтерпретації. Зрозуміло, що методи МТЗ і МВП мають свої певні переваги й недоліки. Так, МТЗ сформульований як спосіб просвічування горизонтально-шаруватої товщі Землі змінним електричним струмом, а МВП ґрунтується на аналізі індукції первинного поля саме в локальних неоднорідностях середовища. З цим може бути пов'язана і різна частотна приуроченість отриманих на експериментальному матеріалі завад. На відміну від імпедансних характеристик індукційні параметри методу МВП не схильні до гальванічних спотворень, тому спочатку проаналізуємо їх поведінку.

МВП. Комплексний індукційний параметр W складається з двох тип перів — дійсного $\text{Re } W$ і уявного $\text{Im } W$ (умовні позначення Vec_Re та Vec_Im за програмою PRC_MTMV).

Карпатську магнітоваріаційну аномалію розглянуто у багатьох монографіях [Rokityansky, 1982; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Сучасна ..., 2015] як яскравий наочний приклад розгортання $\text{Re } W$ для $T = 1000 \div 1500$ с при перетині Карпатської дуги.

За сучасними даними на профілі Мукачєво—Сколе (див. рис. 1, 3, а) чітко фіксуються мінімальні значення W на $T = 900 \div 2000$ с у пунктах Липовець (LPV) і Розтока (RZT), які розташовані на межах Дуклянського покриву. По різні боки від нього спостерігається зміна напрямку $\text{Re } W$ в усьому частотному діапазоні (на південь — у пунктах Драгиня (DRG) Центральної зони та Гайдощ (HDS) Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди Закарпатського прогину; на північ і північний захід — у пункті Бориня

→

Рис. 1. Схема розташування пунктів МВП і ГМТЗ (2015 та 2020 рр.) на схемі тектонічного районування Українських Карпат, за [Глушко, Круглов, 1986]: I — Західноєвропейська платформа; II — Східноєвропейська платформа; III — Передкарпатський прогин; *покриви*: IV — Самбірський, V — Бориславсько-Покутський, VI — Скибовий, VII — Кросненський, VIII — Чорногорський, IX — Дуклянський, X — Поркулецький, XI — Рахівський, XII — Магурський; XIII — Мармароський масив; М — зона Мармароських кліпів; П — зона П'єнінських кліпів; 1—6 — Закарпатський прогин (ЗП) та його зони (1 — Підгалля, 2 — Крайова, 3 — Центральна, 4 — Припаннонська, 5 — Паннонська западина, 6 — Вигорлат-Гутинська вулканічна гряда); 7 — пункти спостереження (а — 2015 р., б — 2020 р.); 8 — пункти спостереження попередніх дослідників (а — за даними [Рокитянский, Ингеро́в, 1999, Сучасна ..., 2015], б — за даними [Гордиенко и др., 2011]); 9, 10 — Карпатська магнітоваріаційна аномалія за результатами попередньої інтерпретації (9 — квазі 3D (а) [Бурахович, 2004] та 3D (б) [Бурахович, Кулик, 2009], 10 — за даними [Рокитянский, Ингеро́в, 1999; Сучасна ..., 2015]); 11 — спостережені типери для $T = 1800$ с.

(BRN) Кросненського покриву). Значення ReW сягають 0,4—0,6, ImW у переважній більшості колінеарні ReW і не перебільшують значення 0,2. Складно виділити пері-

од, який відповідає максимуму частотної характеристики.

Інша картина орієнтації величини W спостерігається вздовж субпаралельного про-

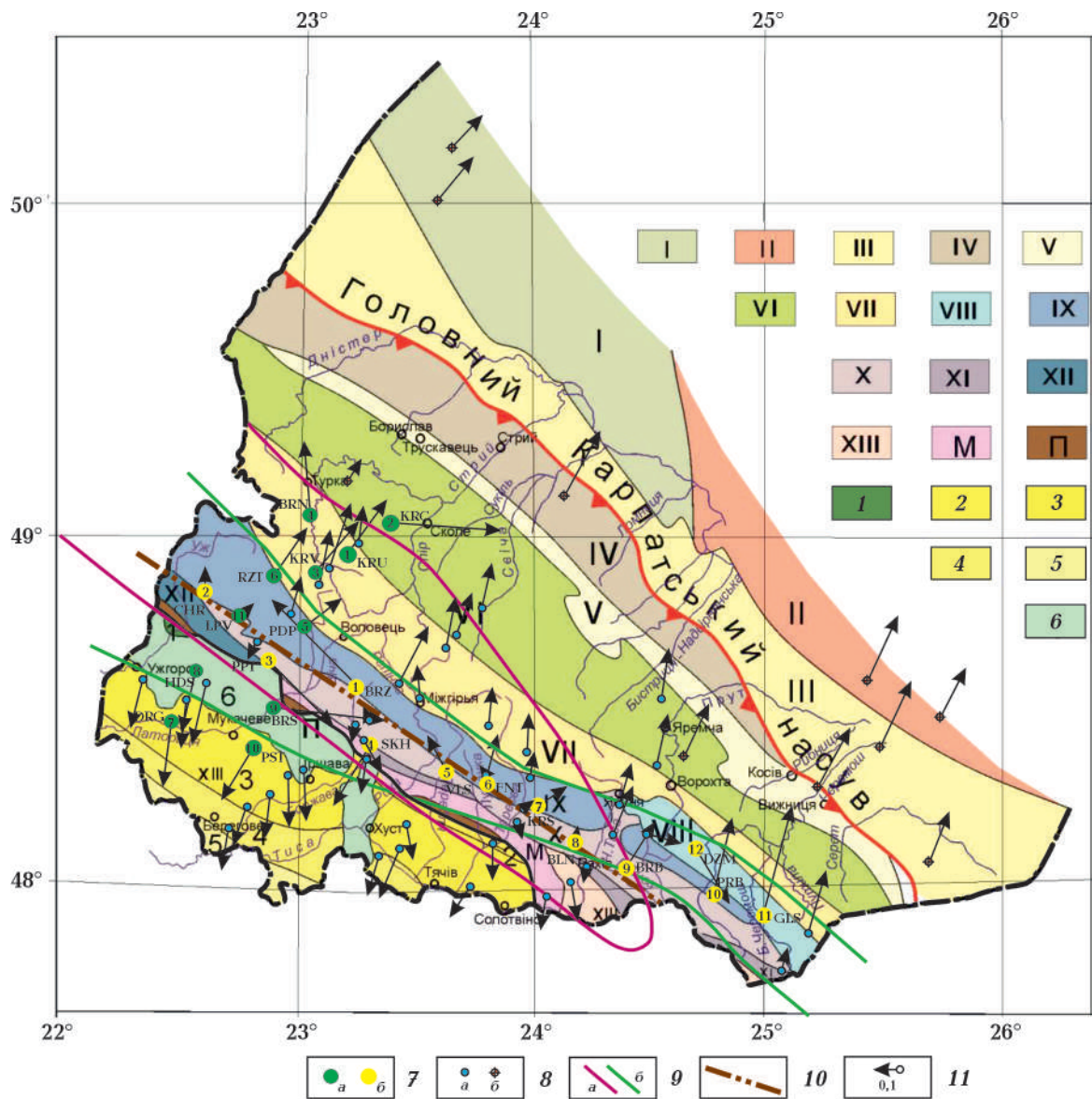


Fig. 1. The scheme of location of MVP and DMTS points (2015 and 2020) on the scheme of tectonic zoning of the Ukrainian Carpathians according to [Glushko, Kruglov, 1986]: I — Western European platform, II — Eastern European platform, III — Pre-Carpathian depression; covers: IV — Sambir, V — Boryslav-Pokutsky, VI — Skiba, VII — Krosno, VIII — Chornogora, IX — Dukla, X — Porkulets, XI — Rakhiv; XII — Magura; XIII — Marmaros massif; zones of clips: M — Marmaros, П — Pieniny; 1—6 — Transcarpathian Depression (ЗП) and its zones (1 — Pidhallia, 2 — Craiova, 3 — Central, 4 — Prepannonian, 5 — Pannonian depression, 6 — Vyhorlat-Huty volcanic ridge); 7 — observation points (a — 2015; б — 2020); 8 — observation points of previous researchers (a — according to [Rokityansky, Ingerov, 1999; Modern ..., 2015]; б — according to [Gordienko et al., 2011]); 9, 10 — Carpathian magnetovariational anomaly according to the results of the previous interpretation (9 — quasi 3D (a) [Burakhovych, 2004] and 3D (б) [Burakhovych, Kulik, 2009], 10 — according to [Rokityansky, Ingerov, 1999; Tretyak et al., 2015]; 11 — observed tippers for $T = 1800$ s.

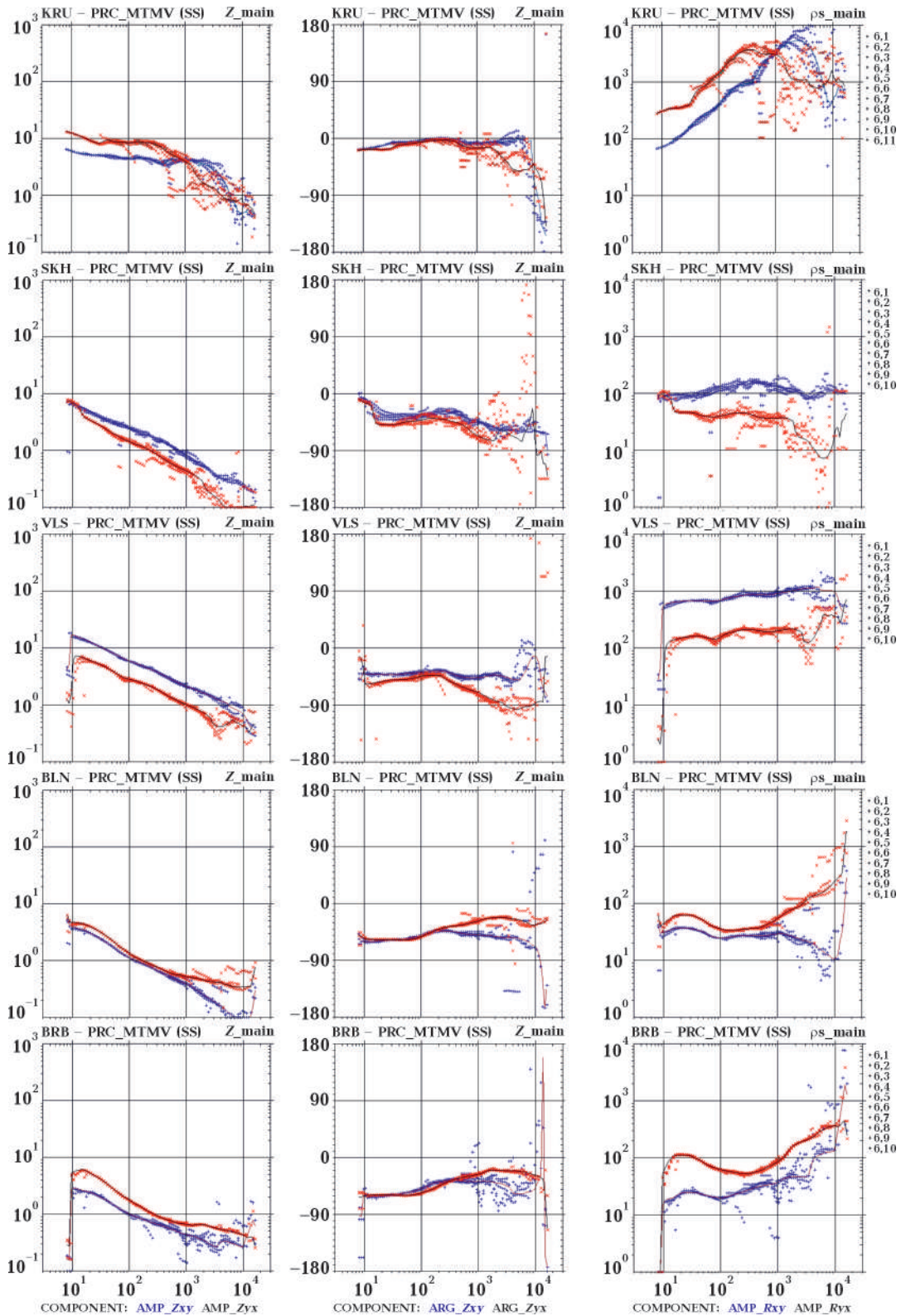


Рис. 2. Приклади типових кривих ГМТЗ Карпатського регіону, отриманих за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV, за напрямками вимірювальних ліній (xy — південь—північ; yx — захід—схід): AMP_Z — амплітуда імпедансу, ARG_Z — фаза імпедансу, AMP_R — амплітуда ρ_{II} .

Fig. 2. Examples of typical DMTS curves of the Carpathian region, obtained using the software package PRC_MTMV, in the directions of measuring lines (xy — south—north; yx — west—east): AMP_Z — impedance amplitude, ARG_Z — impedance phases, AMP_R — amplitude ρ_{II} .

філію Середне—Бориня (див. рис. 1, 3, а), який розташований на південний схід менш як на 20 км. На $T > 900$ с зафіксовано розгортання: на південь ($T = 4000$ с) і південний захід (від $T = 900$ с) — у пункті Пістрялово (PST) центральної зони Закарпатського прогину, на північний схід — у пунктах Кривка (KRV) і Криве (KRU) Кросненського покриву. Значення ReW сягають 0,35—0,6, ImW у переважній більшості колінеарні ReW і не перебільшують значення 0,2. На профілі між ними відсутня зона з мінімальними значеннями W . Тут погано визначається величина W на періодах до 1000 с, але чітко розгортання як за ReW , так і за ImW знайдено між пунктами Берестів (BRS) Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди та Підполоззя (PDP) Дуклянського покриву. У пункті BRS орієнтація ReW змінюється залежно від T з південного сходу на південний захід та зменшується від 0,6 до 0,4. Кут між ReW і ImW становить від 110° до 90° . Величини ReW і ImW майже співрозмірні, значення ImW сягають 0,15—0,30. У пункті PDP орієнтація типперів протилежна. Кут між ReW і ImW 110° . Значення ImW більше за ReW та сягає 0,3—0,55.

Така різка зміна геоелектричних параметрів та їх співвідношень на незначній відстані (до 35 км) засвідчує наявність складної тривимірної глибинної будови та суттєву зміну напрямків телуричних течій в надрах регіону. Це може вказувати як на закінчення локальної аномалії, так і на розрив єдиної геоелектричної структури чи серії локальних аномалій, якими характеризується Карпатський регіон на різних глибинних рівнях.

Розгортання між типперами у пунктах BRN профілю Мукачево—Сколе та Коростів (KRC) профілю Середне—Бориня є свідченням можливого існування локальної вузької аномалії електропровідності, що має орієнтуватися з південного заходу на північний схід. Ці пункти розташовані в різних покривах Карпат (Кросненському та Скибовому) на відстані не більш як 35 км. Проте отримані у пункті KRC істотні значення типперів 0,6—0,9 в усьому частотному діапазоні та його орієнтація на схід не підтверджують попередні дослідження. Тому з по-

зиції впливу техногенних завад необхідно обережно ставитись до якісної інтерпретації у згаданому пункті.

Очікувані мінімальні значення W уздовж профілю Карпатський (див. рис. 3, б), який трасує осьову частину Карпатської магнітоваріаційної аномалії, себе не виправдали. Можна виділити кілька різноорієнтованих аномальних зон чи неоднорідних частин єдиної аномальної структури.

Так, пункт Черногорова (CHR) розташований у зоні зчленування Дуклянського, Поркулецького та Магурського покривів. Тут типпер характеризується напрямком на північний захід, значеннями ReW до 0,1 майже в усьому частотному діапазоні, кутом між ReW і ImW від 0 до 75° , значення ImW здебільшого перевищує 0,1. За такими параметрами цей пункт можна віднести до осової частини Карпатської аномалії.

А ось значення ReW типперу в пункті Плоский потік (PPT), отримані в зоні контакту Поркулецького та Магурського покривів Карпат з Вигорлат-Гутинською вулканічною грядою, сягає 0,3, він має орієнтацію на південний схід. При цьому значення ImW майже нульове. Таке співвідношення характерне для двовимірної електропровідної структури, за межею якої знаходиться пункт спостереження. Те, що маємо край аномалії або її розрив, засвідчує напрямленість на північний захід та значення ReW близько 0,4 у пункті Березники (BRZ), що знаходиться на межі Дуклянського та Поркулецького покривів Карпат. Значення ImW майже нульове.

Пункт Суха (SKH) розташований у вузькій локальній зоні Рахівського покриву. ReW напрямлено на південний захід, має значення 0,2. Можна вважати, що ReW і ImW колінеарні, величина ImW зростає від 0 до 0,1. Просторова орієнтація типперів на двох останніх пунктах (відстань 25 км) вказує на можливість наявності вузької локальної субширотної аномалії електропровідності, що підтверджується даними [Rokityansky, 1982; Сучасна ..., 2015].

Наступні чотири пункти профілю, а саме Вільшани (VLS), Фонтиняси (FNT), Красна (KRS) і Білин (BLN), розташовані в межах Дуклянського та Поркулецького покривів. Тут

існує локальна електропровідна структура (ширина до 15 км, довжина понад 40 км), яку виявлено у різноорієнтованих типперах з величиною до 0,15, ReW у кілька разів перевищує ImW , вони колінеарні. Тільки у пункті BLN, де типпери сягають мінімальних значень, ReW і ImW співрозмірні.

Наступний пункт Беребоя (BRB), розташований у Поркулецькому покриві Карпат, має такі МВ параметри: північно-східна напрямленість типперу, ReW сягає 0,2, ImW майже нульовий. З цього випливає, що пункт може знаходитись за межами локальної аномалії. Типпери в пунктах Пробійнівка (PRB) у Дуклянському покриві та Голошина (GLS) у Чорногорському покриві подібні за своїми оцінками, незважаючи на те, що розміщені в різних тектонічних структурах Карпат: у всьому частотному діапазоні напрямленість — північ і північний схід, величина ReW становить 0,25—0,30, ReW і ImW переважно колінеарні, величина ImW не перевищує 0,1.

Таким чином, можливі два варіанти просторового розподілу аномальної електропровідності: перший — окрема локальна провідна ділянка, що трасується вздовж простягання Карпат і тягнє до Поркулецького, Рахівського покривів і Мармароського масиву; другий — локальна ділянка гальванічно пов'язана та є продовженням попередньої локальної структури, що належить до Дуклянського та Поркулецького покривів.

У пункті Дземброня (DZM) Чорногорського покриву Карпат типпер орієнтовано в усьому частотному діапазоні на південний схід, величина ReW становить 0,25, кут між ReW і ImW — 45° , величина ImW сягає 0,1—0,2. Такі властивості МВ параметра загалом не відповідають раніше спостереженим [Сучасна ..., 2015], хоча у найближчому пункті МВП вектор Візе на $T = 1800$ с має напрямлення на схід і величину близько 0,1. Ці параметри також суттєво відрізняються від спостережених у навколишньому просторі та не відображають вплив Карпатської магнітоваріаційної аномалії. Тому можна припустити наявність локальної тривимірної електропровідної ділянки з орієнтацією південний захід—північний схід.

За якісною інтерпретацією типперів на періодах геомагнітних варіацій від 500 до 5000 с можна виділити чотири локальні різноорієнтовані аномальні зони або їх осі (можливо також розглядати варіант єдиної поздовжньо-неоднорідної електропровідної структури в межах уявлення про осьову зону Карпатської магнітоваріаційної аномалії) (див. рис. 7).

ГМТЗ. Формальну інтерпретацію кривих ГМТЗ виконано з використанням трансформації Ніблетта, залежності опору від глибини $\rho(H)$. Їх локальне оцінювання у кожному пункті спостереження подано у статті [Kushnir et al., 2021 a]. Проаналізуємо параметри формальної інтерпретації, які було згруповано вздовж профілів Мукачево—Сколе (рис. 4), Середне—Бориня (рис. 5) і Карпатський (рис. 6), що дає змогу зобразити їх графічно у вигляді геоелектричних розрізів, хай навіть поки що згладжених, як основний науковий результат (рис. 7).

За візуалізацією результатів трансформацій кривих ρ_{II} уздовж профілю Мукачево—Сколе можна уявити кілька неоднорідних за ρ шарів (див. рис. 4).

Перший — в земній корі Кросненського, Дуклянського та Поркулецького покривів, з верхньою кромкою на глибинах від 10 до 25 км, завширшки близько 55 км, $\rho = 10 \div 350$ Ом · м. Найбільш високопровідна ділянка припадає на Дуклянський покрив, з яким може бути пов'язана вісь Карпатської магнітоваріаційної аномалії. Закарпатський прогин характеризується низьким ρ (див. рис. 4, 5) в інтервалі глибин, який, ймовірно, відповідає високій провідності поверхневих осадових відкладів від 250 до 1000 См у межах Чоп-Мукачівської западини та верхньому шару понижених швидкостей $V_p = 6 \div 6,2$ км/с [Муровська, 2019]. Тільки пункт НДС (Вигорлат-Гутинська вулканічна гряда) за глибиною може тягити до крайової частини Карпатської аномалії або зазнавати її впливу.

Другий шар — у верхній частині верхньої мантії майже вздовж усього профілю від Закарпатського прогину до Скибового покриву має неоднорідний розподіл ρ від 10 до 80 Ом · м. Верхня кромка шару загалом занурюється в напрямку СЄП. У зоні Закарпат-

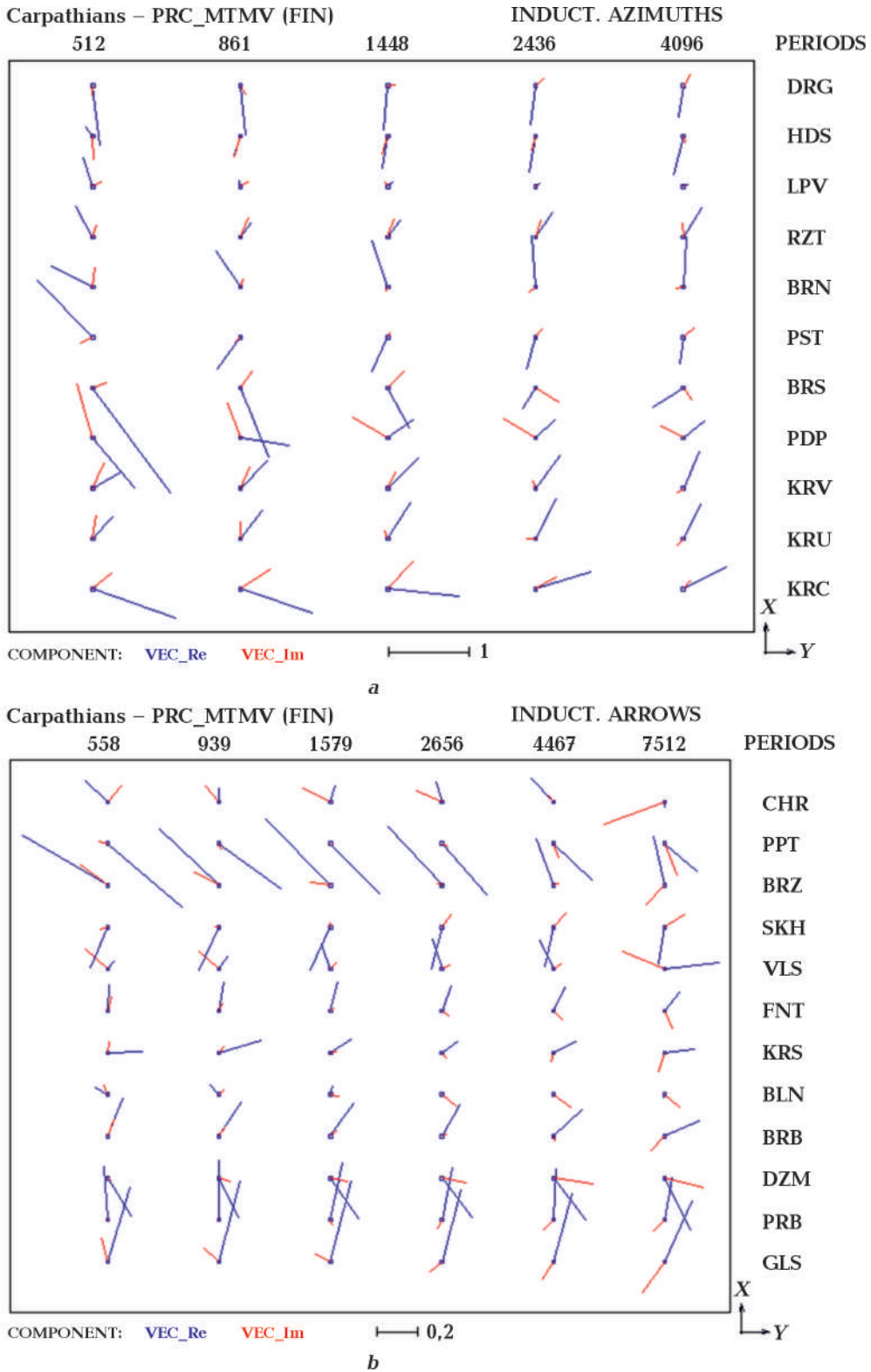


Рис. 3. Типпери Карпатського регіону, отримані за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV. Пункти МВП уздовж профілів Мукачєво—Сколе та Середнє—Бориня (а), профілю Карпатський (б).

Fig. 3. Tippers of the Carpathian region, obtained using the software package PRC_MTMV. MVP points along the Mukachevo—Skole and Sredne—Borynya profiles (a), profile Carpathian (b).

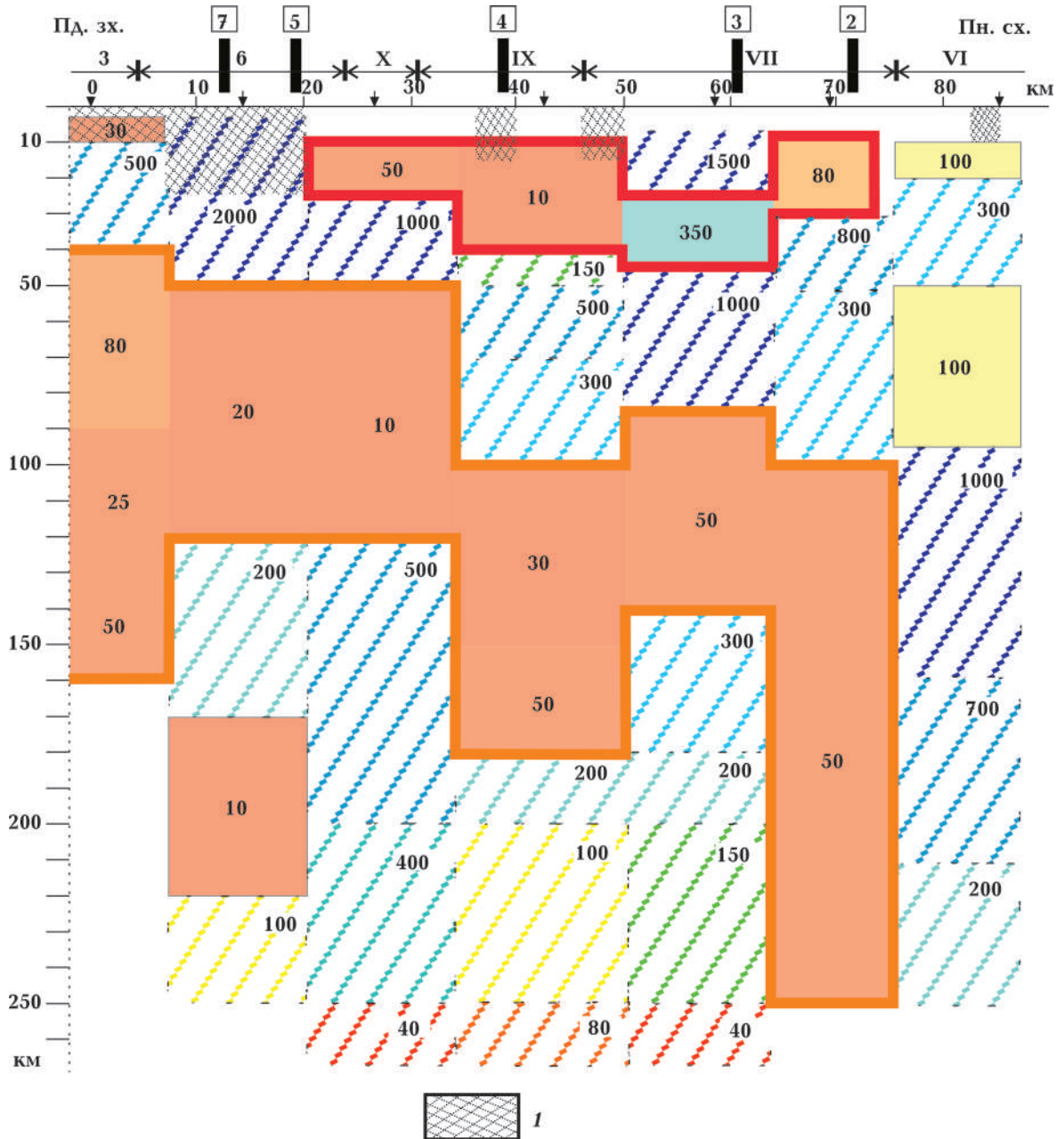


Рис. 4. Візуалізація за результатами трансформацій Ніблетта кривих $\rho_{\text{П}}$ уздовж профілю Мукачево—Сколе. Цифри — значення $\rho(H)$ в Ом·м. Зони розломів (цифри в квадратах): 2 — Ужоцька, 3 — Турківська, 4 — Чорноголовська, 5 — Суцчанівська (Латорицький розлом), 7 — Закарпатська; 1 — осередки сейсмічних подій за період 2000—2021 рр. за даними (www.isc.ac.uk). Розташування профілю на схемі див. на рис. 7. Умовні позначення див. на рис. 1.

Fig. 4. Visualization according to the results of Niblett transformation of $\rho_{\text{П}}$ curves along the Mukachevo—Skole profile. Numbers are the values of $\rho(H)$ in Ohms. Fault zones (figures in squares): 2 — Uzhotska, 3 — Turkiv, 4 — Chornoholovska, 5 — Sushchanivska (Latoritsky fault), 7 — Zakarpattia; 1 — seismic events for the period 2000—2021 according to the data (www.isc.ac.uk). The location of the profile in the scheme, see in Fig. 7. Symbols see in Fig. 1.

ського прогину та Поркулецького покриву вона розташована на межі земної кори та верхньої мантії на глибинах 40—50 км. Як-

що під центральною частиною прогину потужність шару понад 100 км, то далі за профілем вона різко зменшується майже в 2

рази. У межах Дуклянського та Кросненського покривів верхня кромка шару різко занурюється до глибини 80—100 км, тоді як потужність варіює від 50 до 150 км.

Найбільш електропровідні ділянки верхньої мантії припадають на Вигорлат-Гутинську грядку з Поркулецьким покривом і північну частину Кросненського покриву. Аналізуючи розподіл неоднорідностей у верхній мантії вздовж профілю Мукачево—Сколе, можна виділити дві ділянки, у межах яких характерне розгалуження електропровідних шарів за глибиною. Так, аномалія центральної частини Закарпатського прогину поділяється під Вигорлат-Гутинською грядою на дві гілки з глибиною 50 та 170 км, а під Поркулецьким покривом — 10 та 100 км.

Інша картина розподілу ρ за результатами трансформацій кривих ρ_{Π} отримана вздовж профілю Середнє—Бориня (див. рис. 5). Спостерігається також кілька неоднорідних за ρ шарів.

Перший — в земній корі під переходом від Вигорлат-Гутинської гряди до покривів Українських Карпат: Магурського, Поркулецького, Дуклянського та Кросненського. Його верхня кромка майже витримана вздовж 60 км на глибині 10—15 км, ρ збільшується на північ від 10 до 350 Ом · м. Найбільш високопровідна ділянка припадає на Магурський, Поркулецький та частину Дуклянського покривів, з якими може бути пов'язана вісь Карпатської магнітоваріаційної аномалії. Другий шар у верхній частині верхньої мантії майже повторює територіальну приуроченість паралельного йому профілю Мукачево—Сколе та вирізняється неоднорідним розподілом за ρ від 10 до 150 Ом · м. Глибина залягання верхньої кромки шару варіює від 40 до 90 км, він занурюється в напрямку СЄП. Тільки в зоні центральної частини Закарпатського прогину ця кромка розташована на межі земної кори та верхньої мантії на глибині 40 км, припускається потужність до 130 км. Далі за профілем під Вигорлат-Гутинською грядою шар різко занурюється до глибини 70 км, при цьому потужність залишається майже однаковою — 110 км.

Звернемо увагу на те, що під найбільш

електропровідною частиною в земній корі на цьому профілі (пікети від 25 до майже 50 км (див. рис. 5)) також спостерігається загальний підйом верхньомантієвого шару до глибини 60 км з $\rho = 20$ Ом · м. У межах Дуклянського та Кросненського покривів шар різко занурюється до глибини 90 км, а його потужність зростає від 20 до 80 км відповідно. Найбільш електропровідні ділянки верхньої мантії припадають на Вигорлат-Гутинську грядку (близько 6000 См) і Магурський, Поркулецький та частину Дуклянського покривів (2000 См). Інакше кажучи, на двох паралельних профілях, які перетинають Закарпатський прогин та частину Українських Карпат, спостерігається суттєва відмінність у розподілі електропровідності. Якщо на північнішому профілі Середнє—Бориня наявний загальний підйом верхніх кромок аномалій як у земній корі, так і у верхній мантії, то південніше на профілі Мукачево—Сколе аномалії розгалужуються у верхній мантії за глибиною. Порівняння геоелектричних параметрів може вказувати на прикінцеву частину чи розрив загальної аномалії земної кори у південно-східному напрямку вздовж Українських Карпат. Крім того, експериментальні дані вздовж цих профілів засвідчують наявність північної межі Карпатської аномалії в земній корі, яка має вигляд зони завширшки 25—30 км (на північ до Скибового покриву) від її найбільш електропровідної частини (Магурський, Поркулецький та частина Дуклянського покривів), а також північної межі Карпатської астеносфери, яка територіально тягнеться до межі Скибового та Кросненського покривів.

Візуалізацію за результатами трансформацій кривих ρ_{Π} уздовж профілю Карпатський показано на рис. 6. Тут можна уявити кілька неоднорідних за ρ шарів, які розташовані на глибинах у земній корі, верхній частині верхньої мантії та в зоні їх контакту. У земній корі виділено три ділянки: вздовж межі північної частини Дуклянського та Поркулецького покривів (пікети 0—40 км); у центральній частині Поркулецького покриву (пікети від 50 до майже 80 км); у північній частині Чорногорського та Дуклянського покривів (пікети 160—200 км). Ці

Рис. 5. Візуалізація за результатами трансформацій Ніблетта кривих ρ_{Π} уздовж профілю Середне—Бориня. Зони розломів (цифри в квадратах): 2 — Ужоцька, 4 — Черноголовська, 7 — Закарпатська. Умовні позначення див. на рис. 1, 4, 7.

Fig. 5. Visualization according to the results of Niblett transformations of curves ρ_{Π} along the profile Seredne—Borynya. Fault zones (numbers in squares): 2 — Uzhorod, 4 — Chornoholovska, 7 — Zakarpattia. Symbols see in Fig. 1, 4, 7. →

ділянки майже витримані за $H = 5 \div 10$ км та характеризуються потужністю до 20 км. Винятком є аномалія у Дуклянському покриві першої ділянки, де потужність досягає майже 30 км. Значення ρ у середньому наближено до $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, але коливається в межах від 5 до $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Центральна частина Дуклянського та Поркулецького покривів півдня Українських Карпат (пікети профілю 80—150 км) вирізняється складнобудованою неоднорідністю, оскільки частина якої за глибиною припадає на зону переходу кори до мантиї. Вона має гальванічний зв'язок з поверхневою осадовою товщею (пікети 120—150 км на межі Дуклянського та Поркулецького покривів) і заглиблюється крізь земну кору та частину верхньої мантиї до глибини 80 км по системі мозаїчно розташованих провідників з різним опором від 5 до $200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Загалом неоднорідність можна поділити на дві частини:

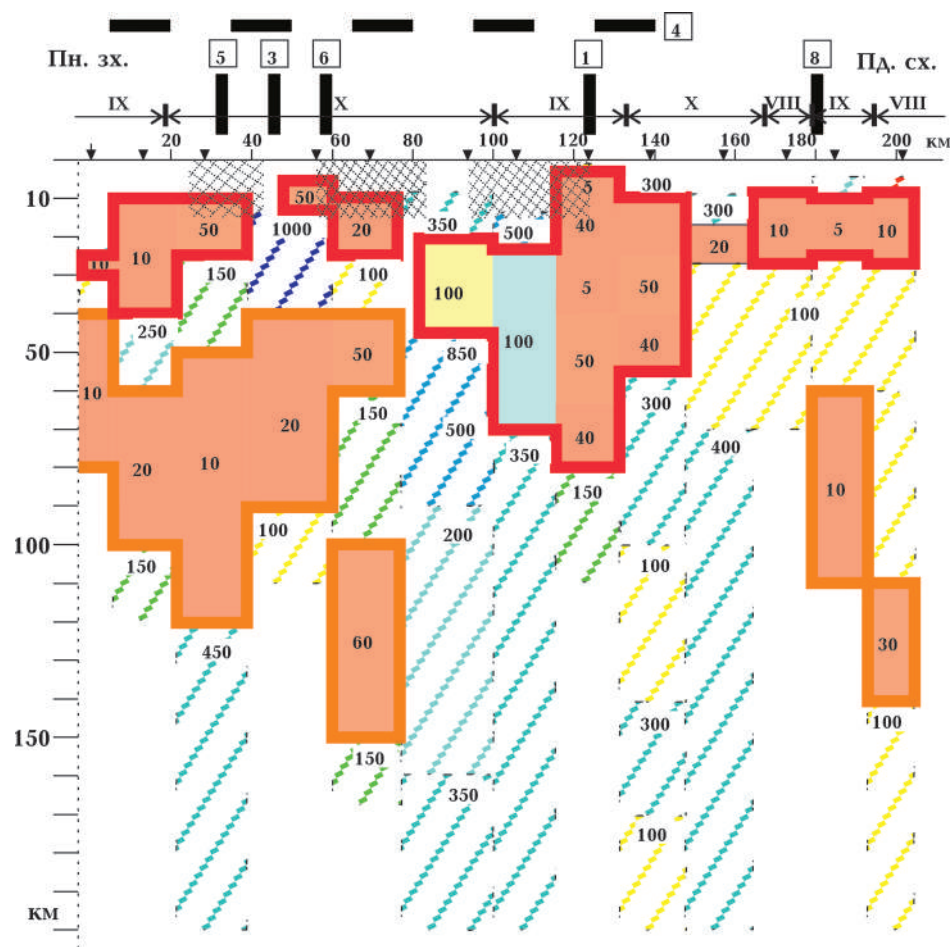
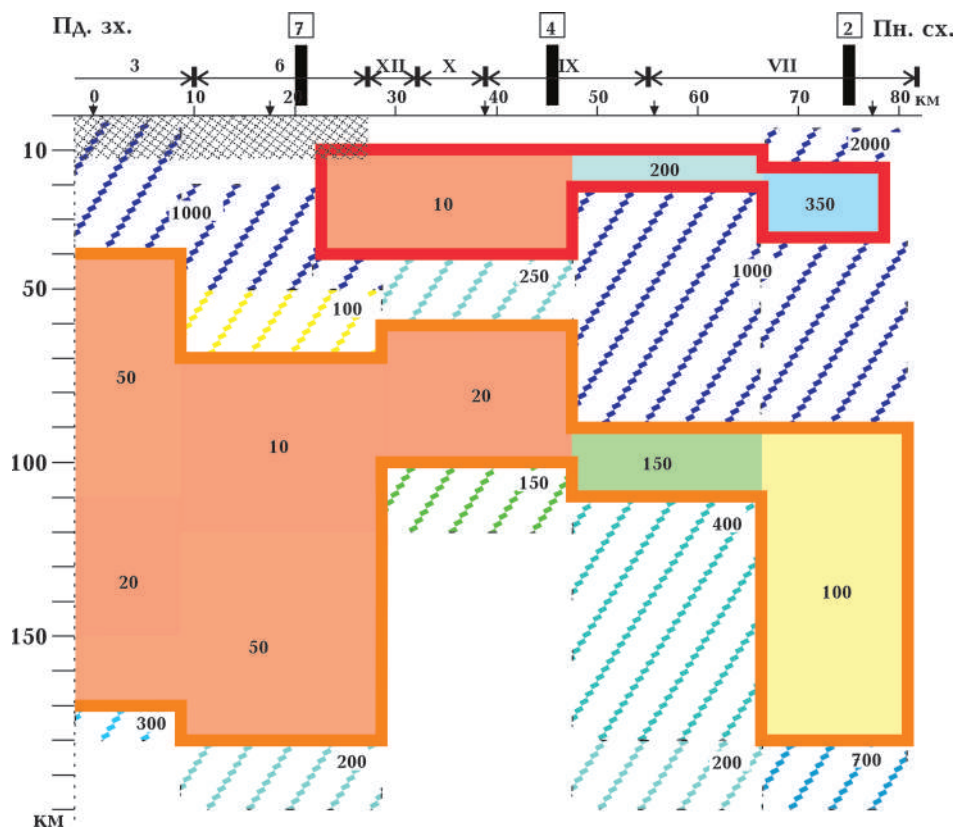
- західну — менш провідну ($S = 250 \text{ См}$), пікети 80—120 км, яка характеризується глибиною залягання суцільного провідника 20—25 км, потужність зростає за профілем від 25 до 45 км з ρ від 100 до $200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- східну — більш високопровідну ($S = 1500 \div 3000 \text{ См}$), пікети 120—150 км, яка вирізняється на глибині 3—10 км наявністю розшарованого за ρ від 5 до $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ провідника потужністю майже 80 км в осевій частині (Дуклянський покрив), що зменшується за профілем до 40 км; спо-

стерігається підйом розшарованих за ρ провідників з північного заходу на південний схід під кутом до вертикальної осі приблизно 45° (в земній корі) та 30° (у верхній частині верхньої мантиї).

Верхню мантию за профілем можна поділити на три ділянки. Північна (пікети 0—80 км, уздовж Дуклянського та Поркулецького покривів) — складнобудована система провідників, яка загалом занурюється на південний схід, при цьому значення ρ зростають від 10 до $60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Глибина розташування ділянки коливається в значних межах від 40 до 100 км і більше. Потужність нерівномірна за профілем, становить як 20, так і 70 км. Можна припустити існування двох зон, де спостерігається розгалуження за глибиною розташування верхньої кромки аномалії у верхній мантиї. Перша (біля пікета 10 км) — аномалія на межі кора—верхня мантия (40—80 км, північ Дуклянського покриву) розгалужується на межі з Поркулецьким покривом на дві гілки: корову (від 10 до 25—40 км) і верхньомантію (60—100 км). Остання характеризується поступовим підйомом H до глибини 40 км уздовж профілю до пікета 80 км у межах Поркулецького покриву. Друга ділянка (біля пікета 60 км) — аномалія на межі кора—верхня мантия (40—90 км, центральна частина Поркулецького покриву) поділяється також на дві гілки: верхня є продовженням верхньомантії гілки першої зони (40—60 км), нижня занурюється до глибин 100—150 км

Рис. 6. Візуалізація за результатами трансформацій Ніблетта кривих ρ_{Π} уздовж профілю Карпатський. Зони розломів (цифри в квадратах): 1 — Тетерівська I (Гуцульський розлом або Тячево-Надвірнянсько-Монастирецька зона), 3 — Турківська, 4 — Черноголовська, 5 — Суцанівська (Латорицький розлом), 6 — Боржавська, 8 — Тетерівська II зона лініментів. Умовні позначення див. на рис. 1, 4, 7.

Fig. 6. Visualization according to the results of Niblett transformation of ρ_{Π} curves along the Carpathian profile. Fault zones (numbers in squares): 1 — Teterivska I (Hutsul fault or Tyachevo-Nadvirnyansko-Monastyrtska zone), 3 — Turківська, 4 — Chornoholovska, 5 — Sushchanivska (Latoritsky fault), 6 — Borzhavska, 8 — Teterivska II zone of lineaments. Symbols see in Fig. 1, 4, 7. →



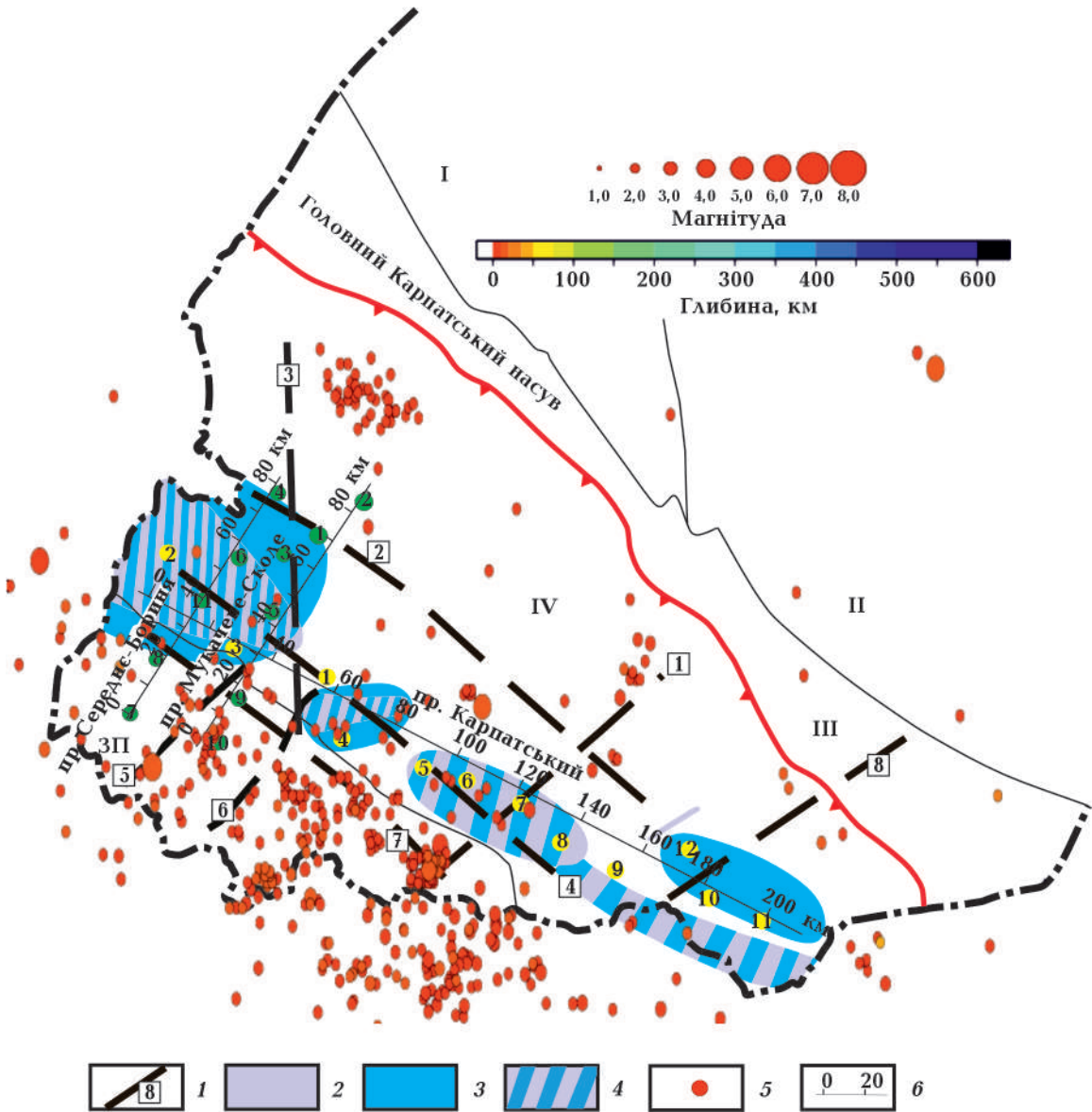


Рис. 7. Аномалії електропровідності та осередки сейсмічності Українських Карпат: I — Західноєвропейська платформа, II — Східноєвропейська платформа, III — Передкарпатський прогин, IV — Складчасті Карпати, ЗП — Закарпатський прогин; 1 — зони розломів (цифри в квадратах: 1 — Тетерівська I (Гуцульський розлом, або Тячево-Надвірнянсько-Монастирєцька зона), 2 — Ужоцька, 3 — Турківська, 4 — Черноголовська, 5 — Суццанівська (Латорицький розлом), 6 — Боржавська, 7 — Закарпатська, 8 — Тетерівська II зона лінеаментів); 2—4 — аномалії електропровідності, які виділено в результаті якісної інтерпретації даних МВП (2), МТЗ (3), МВП і МТЗ (4); 5 — осередки сейсмічних подій за період 2000—2021 рр. за даними (www.isc.ac.uk); 6 — лінії інтерпретаційних профілів Середне—Бориня, Мукачево—Сколе, Карпатський. Інші умовні позначення див. на рис. 1.

Fig. 7. Anomalies of electrical conductivity and seismicity of the Ukrainian Carpathians: I — Western European Platform, II — Eastern European Platform, III — Pre-Carpathian Depression, IV — Folded Carpathians, ЗП — Transcarpathian Depression; 1 — fault zones (figures in squares: 1 — Teterivska I (Hutsul fault or Tyachevo-Nadvirnyansko-Monastyrnetska zone), 2 — Uzhotska, 3 — Turkivska, 4 — Chornoholovska, 5 — Sushchanivska (Latorytsky fault), 6 — Borzhavska, 7 — Transcarpathian, 8 — Teterivska II zone of lineaments); 2—4 — electroconductivity anomalies, which are allocated as a result of qualitative interpretation of data MVP (2), MTZ (3), MVP and MTZ (4); 5 — foci of seismic events for the period 2000—2021 according to the data (www.isc.ac.uk); 6 — lines of interpretation profiles Sredne—Borynya, Mukachevo—Skole, Carpathian. Symbols see in Fig. 1.

на відстані майже 20 км. Слід підкреслити, що зони розгалуження просторово збігаються з розташуванням перших двох аномальних ділянок у земній корі, а сама аномалія у верхній мантії поступово зникає з наближенням до коромантійної неоднорідності, що підтверджується і зростанням ρ до 50—60 Ом · м. Центральна ділянка (пікети 80—180 км, Черногорський, Дуклянський та Поркулецький покриви) на глибинах нижче 80 км, тобто під коромантійною неоднорідністю, представлена диференційованою товщею з ρ від 100 до 1000 Ом · м. Південна ділянка (пікети 180—200 км, Черногорський та Дуклянський покриви) характеризується майже вертикальним проникненням з півдня аномалії електропровідності ($H = 60$ км, $\rho = 10 \div 30$ Ом · м).

Результати формальної інтерпретації кривих ГМТЗ добре узгоджуються з аналізом даних МВП, але прикінцевий результат має бути отриманий тільки за розрахунками тривимірного моделювання.

Обговорення. Намічені в результаті аномалії електропровідності (див. рис. 7) відповідають розломній тектоніці території Українських Карпат [Смірнова, 2002; Геологічна ..., 2007; Заяць, 2013] і створюють ланцюг, вісь якого проходить між П'єнінським (Закарпатським) і Черноголовським глибинними розломами, а в південній частині — між останнім і Боринським (Ужоцьким). На північний схід від Черноголовського до Боринського глибинного розлому аномалія також виявляється, але її геоелектричні параметри менш виражені, що можна інтерпретувати як вплив високоаномальної електропровідності або як повільне згасання останньої. Підкреслимо, що, по-перше, на сьогодні в цій частині Українських Карпат, на жаль, відсутні сучасні експериментальні електромагнітні дані, по-друге, остаточне рішення слід приймати після побудови глибинної геоелектричної моделі.

У поздовжньому напрямку виділяють Лемківський, Бойківський і Гуцульський мегаблоки, які орієнтовані поперек простягання Українських Карпат. Відверто кажучи, якщо в геоелектричному сенсі верхня частина верхньої мантії вздовж профілю Карпат-

ський і поділяється на три сегменти, то їх контури не відповідають розташуванню глибинних розломів, таких як Латорицький, Боржавський, Гуцульський, та деяких поперечних зон лінементів, які виділено за космознімками — Тетерівської I (Гуцульський розлом, або Тячево-Надвірнянсько-Монастирська зона), Тетерівської II і Суцанівської (Латорицький розлом). Утім ці розломи, або зони перетину кількох розломів, наприклад Латорицького та Турківського, припадають на центральні частини мантійних електропровідних сегментів. При цьому вони відповідають тим ділянкам, де спостерігається найбільша електропровідність. Так, максимальна електропровідність до 7000 См на глибинах від 50 до 120 км першого мантійного сегмента, просторово розташована в зоні перетину Латоринського і Турківського розломів (пікети 30—50 км); більш як 5000 См на глибинах від 5 до 80 км другого коромантійного сегменту припадає на Гуцульський розлом (біля пікета 120 км, пункт KRS). При цьому не має значення, за яким посиленням [Смірнова, 2002; Геологічна ..., 2007] визначається просторове положення останнього розлому; електропровідність близько 5000 См на глибинах від 60 до 110 км відповідає третьому мантійному сегменту у Тетерівській II зоні лінементів (пікет 180 км). Аналіз просторового зіставлення поперечних розломів з аномаліями електропровідності в земній корі не дав змоги виявити однозначну залежність. Іноді розломи (наприклад, Латорицький) чи зони лінементів (Тетерівська II) можна розглядати як лінії поділу між високими (300—1000 Ом · м) та низькими (10—50 Ом · м) значеннями ρ . Для Боржавського та Гуцульського розломів — це центральні частини аномалій високої електропровідності з ρ від 5 до 50 Ом · м на глибинах залягання верхньої кромки від 5 до 10 км.

Існують уявлення про те, що зони розтягу виявляються у підвищеній електропровідності [Wannamaker, 2005; Spratt et al., 2009], а етапи розтягу пов'язані з нагромадженням первинно-осадово-вулканогенних порід, надходженням флюїдів із глибоких шарів Землі, широким поширенням процесів метасоматичного перетворення порід і графі-

тизацією. Проте отриманий просторовий розподіл аномалій електропровідності не відповідає зонам розтягу, які було виділено на основі градієнтів швидкостей вертикальних рухів земної кори [Сучасна ..., 2015, с. 102]. Разом з тим за результатами геолого-геофізичної інтерпретації швидкісної моделі за профілем RomUkrSeis [Starostenko et al., 2020] під осадовим прогином на окраїні СЄП виявлено структури з низькими значеннями швидкості поширення поздовжніх хвиль (6,2—6,3 км/с) на глибині від 10 до 40 км. Їх інтерпретують як структури розуцільнення та розтягу [Амашукелі, 2021; Старостенко та ін., 2022]. Якщо проінтерполювати та продовжити аномалію електропровідності в земній корі на глибині від 10 до 30 км на південний схід, то вона просторово може опинитись між пунктами вибуху 15 305—15 306, тобто пікетами 260—330 км профілю, коли він перерізає Внутрішні Карпати, саме в зоні розуцільнення та розтягу. Протилежна ситуація складається за субпаралельним профілем PANCAKE [Starostenko et al., 2013] між пунктами вибуху 50 105 та 50 106 (пікети 220—290 км), який перетинає аномалію електропровідності, що розташована в інтервалі глибин від 10—25 до 25—40 км. У верхній корі під осадовими відкладами Карпат потужністю до 20 км (поверхня дорифейського кристалічного фундаменту, за [Заяць, 2013], від 14 до 18 км) спостерігаються вищі швидкості порівняно з такими на профілі RomUkrSeis [Амашукелі, 2021; Старостенко та ін., 2022], які можуть відповідати типовим коровим швидкостям докембрійського кратону. На цій ділянці профілю спостерігається складний перехід від Паннонського басейну до СЄП за значеннями швидкостей поздовжніх хвиль як у земній корі (середня та нижня кора — від 6,3 до 6,4—6,93 км/с), так і в мантії (від 7,98 до 8,3 км/с) відповідно. Загалом якісно спостерігається структура аномальної електропровідності в мантії, яка відповідає структурі літосфери за профілями ГСЗ і занурюється із заходу на схід.

Просторовий розподіл аномалій електропровідності та геоелектрична структура розрізу надр південного заходу Українських Кар-

пат, які отримано у цій праці, добре збігаються з геотермічним районуванням [Кутас, 2021]. І геотермічний режим земної кори, тісно пов'язаний з її будовою та особливостями розвитку, і висока електропровідність у надрах зазвичай пояснюються наявністю потоків глибинних флюїдів, зокрема і газоподібних. Відомо, що генезис аномальної електропровідності Закарпатського прогину на мантійних глибинах пов'язаний з високим тепловим потоком (75—130 мВт/м²), який сформувався внаслідок надходження тепла із мантії у формі вертикальних тепломасопотоків. Смуга поступового зниження теплових потоків від 75 до 60 мВт/м² у південно-західній частині Складчастих Карпат між Ужоцьким і Закарпатським розломами відповідає, з одного боку, зануренню мантійного провідника (H від 50 до 100 км) та його виклинюванню під Скибовою зоною, а з іншого — ланцюгу локальних різноорієнтованих аномальних ділянок у земній корі, загальна вісь яких проходить поміж Закарпатським і Чорноголовським глибинними розломами (див. рис. 4, 5, 7), так звана Карпатська аномалія електропровідності. Регіональне поступове зниження температур і теплових потоків (від 50—70 до 35—55 мВт/м²) з північного заходу на південний схід у Складчастих Карпатах також виявляється в неоднорідній геоелектричній структурі (див. рис. 6).

І донині з питання природи глибинних провідників, а це стосується і Карпатської аномалії, розвиваються дві основні концепції — електронна і флюїдна. Іноді автори однієї публікації [Жамалетдинов, Кулик, 2012] дотримувалися різних поглядів. А інколи з часом у процесі досліджень змінювали свої погляди [Rokitiyansky et al., 1975; Сучасна ..., 2015]. Аналіз опублікованої літератури, що стосується цього питання в працях [Бурахович, 2004; Сучасна ..., 2015], і проведені розрахунки [Гордиенко и др., 2011] дають можливість дійти висновку, що з'ясування природи аномальної електропровідності є дуже складним та неоднозначним завданням; ймовірно, Карпатська аномалія може утворюватися комбінованою флюїдно-електронною провідністю. Вирішення цьо-

го питання вказує на особливі умови фізичного стану та геодинамічного розвитку глибинних зон Землі.

Зазвичай прояви сучасної геодинаміки, а саме землетруси, реалізуються за межами аномалій електропровідності або вище [Кушнір, Бурахович, 2019]. Взагалі сейсмічність Українських Карпат підтверджує таке уявлення [Сучасна ..., 2015; Kushnir et al., 2021б]. Якщо поррахувати кількість сейсмічних подій тільки за період 2000—2021 рр. (www.isc.ac.uk) на однакових площах понад 4000 км² у межах Карпатської аномалії та на південний захід від неї, отримані значення відрізняться в 4 рази. На північному сході таке значення буде меншим у 2 рази. Інакше кажучи, у переважній більшості землетруси реалізуються у Закарпатському прогині на заході від Карпатської аномалії електропровідності (див. рис. 7) на глибинах, вищих за верхню кромку аномалії, яка прогнозується на мантийних глибинах 40—70 км. Наприклад, тільки на незначній за площею ділянці ця глибина змінюється потужними уступами залежно від розташування Суцанівського розлому: на півночі вона сягає 40 км у центральній частині ЗП та 70 км у Вигорлат-Гутинській гряді (див. рис. 5, профіль Середне—Бориня), на півдні від нього ці значення становлять 40 і 50 км (див. рис. 4, профіль Мукачево—Сколе) відповідно. Складно виявити будь-яку залежність, тому що найменша кількість сейсмічних подій припадає на ту частину ділянки, де глибина аномалії найвища й зі значними перепадами. Осередки землетрусів вишиковуються вздовж Закарпатського розлому, який оконтурює ланцюг аномалій електропровідності в земній корі, їх гіпоцентри залягають на більших глибинах (понад 10 км) порівняно з іншими саме на ділянці, де спостерігається максимальна глибина до верхньої кромки.

Загально відомо, що сейсмічні події реалізуються в зонах активізованих глибинних розломів. У даному питанні Карпатський регіон не є винятком (див. рис. 7). Наприклад, спостерігається концентрація уздовж глибинних розломів (Тетерівський І і Суцанівський), у зонах між ними (Суцанівський, Боржавський та Закарпатський, й Боржавський,

Тетерівський І і Закарпатський) або у зонах їх перетину (Чорноголовського із Суцанівським, Боржавським і Тетерівським І).

Уздовж профілю Карпатський прояви сейсмічних подій локалізуються нерівномірно, їх переважна більшість припадає на частину від майже пікету 25 км до пікету 125 км уздовж Чорноголовського розлому до перетину з Тетерівським І. На прикладі коромантійної ділянки (пікети 80—150 км) розглянемо співвідношення вогнищ землетрусів і глибинний розподіл електропровідності. Як зазначено вище, ця зона поділяється на менш провідну північну, та більш провідну південну. Епіцентри землетрусів (кількістю до 10 з $M \leq 3$ на глибині до 10 км) сконцентровані переважно в північній частині неоднорідності (пікети 90—125 км) над вертикальними контактами провідників, різних не тільки за ρ (5—800 Ом·м), але й за потужністю (25—80 км) і глибиною залягання (3—23 км). Якщо на південь від Тетерівської І зони розлому профіль Карпатський не проходить крізь ділянки сейсмічної активності, то на північ майже кожен перетин Чорноголовського розлому з іншими, наприклад Боржавським або із системою з кількох різноорієнтованих розломів, таких як Турківський та Суцанівський, супроводжується реалізацією сейсмічних подій. Такою є ділянка прикінцевої північно-східної частини Боржавського розлому, де проєкції на поверхню меж аномальної електропровідності в земній корі (див. рис. 6, 7) просторово збігаються з епіцентрами землетрусів, що вишиковуються за периметром (кількістю близько 11 з $M \leq 2$ на глибині до 10 км). Аналогічною електропровідною структурою можна схарактеризувати ділянку (пікети 25—42 км) перетину Чорноголовського із Суцанівським та Турківським розломами. Тут землетруси в кількості більше 4 з $M \leq 2$ на глибині до 10 км розташовані по різні боки від межі аномалії в земній корі. Нижче передбачається складна неоднорідність на мантийних глибинах. Так, на відстані близько 30 км з південного заходу на північний схід вона спочатку занурюється на глибину від 50 до 100 км, потім піднімається до глибини 85 км

(див. рис. 4, профіль Мукачево—Сколе, пікети 27—60 км). Уздовж профілю Карпатський, тобто вздовж основних структур Карпат, на відстані 20 км (пікети 23—43 км) згадана структура піднімається з глибини 60 до 40 км (див. рис. 6).

Таким чином, усі сейсмоактивні ділянки в межах Карпатської аномалії характеризуються перемежованістю (як вертикальною, так і горизонтальною) зон високого та низького опору не тільки в земній корі, а й у верхній мантії, що засвідчує їх високу гетерогенність і тектонічну шаруватість. Такі різноорієнтовані токові структури можна розглядати як джерело для створення середовища напружено-деформаційного стану. Наявність тектонічної шаруватості середньої та нижньої кори забезпечує достатні умови для збільшення пористості та проникності середовища і сприяє звільненню накопиченої сейсмічної енергії.

Висновки. За результатами сучасних синхронних геоелектромагнітних досліджень отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій й електричного поля на поверхні Землі та уяву про розподіл електропровідності й геоелектричну структуру розрізу надр південного заходу Українських Карпат. Виконано обробку експериментальних матеріалів за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV, проаналізовано властивості функцій відгуку (типперів) для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 5000 с і кривих позірною питомого електричного опору (амплітудні значення та фази імпедансу) від 10 до 10 000 с у різних тектонічних структурах.

За якісною інтерпретацією типперів, амплітудних і фазових кривих ГМТЗ та аналізом згладжених геоелектричних розрізів, отриманих за трансформаціями Ніблетта, можна виділити неоднорідний тривимірний розподіл аномальних зон у Карпатському регіоні. У земній корі можна виділити чотири локальні різноорієнтовані аномальні зони або їх вісі (можливо також розглядати варіант єдиної поздовжньо-неоднорідної електропровідної структури згідно з уявленнями стосовно осьової зони Карпатської магнітоваріаційної аномалії) (див. рис. 7):

– північний захід Українських Карпат (частини Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди, Магурського, Поркулецького, Дуклянського та Кросненського покривів); передбачається локальна ізометрична за площею електропровідна ділянка розміром близько $75 \times 50 \text{ км}^2$; просторово збігається з розташуванням Карпатської магнітоваріаційної аномалії за даними [Рокитянский, Ингеров, 1999; Бурахович, 2004; Гордиенко и др., 2011; Сучасна ..., 2015];

– центральна частина півдня Українських Карпат (переважно частина Поркулецького покриву); очікується наявність вузької локальної зони вздовж загального напрямку м. Міжгір'я—м. Мукачево. Вона виявляється у розвороті типперів і, крім того, за різними типами кривих ГМТЗ та неоднорідним розподілом за ρ ;

– південний схід Українських Карпат (переважно частини Дуклянського, Поркулецького, Рахівського покривів та Мармароського масиву). Можливі два варіанти просторового розподілу аномалії. По-перше, можливе існування двох локальних ділянок з перетиском уздовж лінії м. Рахів—м. Ясеня. По-друге, потребує перевірки варіант двох просторово відокремлених ділянок: єдиної витягнутої структури, що збігається з осью частиною Карпатської магнітоваріаційної аномалії за даними [Рокитянский, Ингеров, 1999; Бурахович, 2004; Гордиенко и др., 2011; Сучасна ..., 2015], і локальної (переважно частини Чорногорського, Дуклянського та Поркулецького покривів).

Розподіл електропровідності на глибинах верхньої мантії не є однорідним шаром, трапляються ділянки як з однорідним шаром, так і диференційовані з різним опором всередині нього; крім того, виявлено можливі зони розгалуження електропровідності за глибиною. Неоднорідна тривимірна структура аномальної електропровідності зафіксована в регіоні Українських Карпат від Закарпатського прогину до Скибового покриву:

– спостерігаються загальне поглиблення верхньої кромки астеносфери на північний схід від 40—60 км (Закарпатський прогин) до 90—100 км (Кросненський покрив) і різ-

ке поглиблення вздовж Поркулецького та Дуклянського покривів;

– варіювання верхньої кромки астеносфери та її гальванічні розриви можливі вздовж простягання внутрішньої і центральної зон Зовнішніх Карпат; виділено три ділянки: північну — до лінії м. Тячів — с. Фонтиняси (поглиблення на південь верхньої кромки від 40—50 до 90 км); центральну — представлена диференційованою товщею з ρ від 100 до 1000 Ом · м нижче коромантійної неоднорідності; південну — проникнення з півдня або вертикальне проникнення, бо верхня кромка занурюється з глибини від 60 до 110 км.

Отриманий розподіл електропровіднос-

ті в земній корі та верхній мантії території Східних Карпат можна використовувати з метою побудови глибинних геологічних і геотектонічних моделей, а також пояснення геодинамічних процесів регіону.

Публікація містить результати досліджень, проведених за прикладною темою № III - 16 - 20: «Геофізичне дослідження літосфери південного заходу Східноєвропейської платформи та її обрамлення у зв'язку з глибинною дегазацією з метою виявлення шляхів міграції флюїдів» (2020—2022 рр.) та № II-16-20 «Геодинамічний розвиток та формування корисних копалин Закарпатського прогину на основі новітніх геолого-геофізичних даних» (2022—2024 рр.).

Список літератури

- Амашукелі Т.А. Структура літосфери південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи за новітніми профілями ГСЗ: автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київ, 2021. 24 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 680 с.
- Бурахович Т.К. Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Карпатского региона. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 4. С. 63—74.
- Бурахович Т.К., Кулик С.Н. Трехмерная геоэлектрическая модель земной коры и верхней мантии западной части Украинского щита и его склонов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 1. С. 88—99.
- Геологічна карта Українських Карпат. Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області України. 1 : 100 000. Сост. В.В. Глушко, В.В. Кузовенко, В.Є. Шлапінський. Ред. Ю.З. Крупський. Звіт ЗАО Концерн «Надра». Київ, 2007. 228 с.
- Глушко В.В., Круглов С.С. (ред.). Тектоническая карта Украинских Карпат масштаба 1 : 200 000. Киев: Изд. Мингео УССР, 1986.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.Н., Усенко О.В. Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2011. 129 с.
- Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 22—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116747>.
- Заяць Х. Глибинна будова надр Західного регіону України на основі сейсмічних досліджень і напрямки пошукових робіт на нафту та газ. Львів: Центр Європи, 2013. 136 с.
- Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры и геодинамические процессы. В кн.: Флюиды и геодинамика. Материалы Всероссийского симпозиума. Москва: Наука, 2006. С. 85—104.
- Киссин И.Г. Флюидная система и геофизические неоднородности консолидированной земной коры континентов. Москва: Изд. ОИФЗ РАН, 2001. С. 4—19.
- Кравченко А.П., Сапужак Я.С. Геоэлектрическая характеристика осадочного чехла Карпатского региона. *Геофиз. журн.* 1989. Т. 2. № 3. С. 73—78.

- Кутас Р.І. Глибинна дегазація і нафтогазоносність Східних (Українських) Карпат: геодинамічний і геотермічний аспекти. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 6. С. 23—41. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251551>.
- Кушнир А.Н., Бурахович Т.К. Электропроводность сейсмоактивных регионов Украины. LAPLAMBERT Academic Publishing, 2019. 108 с. Режим доступа <https://www.morebooks.shop/store/gb/book/Электропроводность-сейсмоактивных-регионов-Украины/isbn/978-613-9-45196-8>.
- Муровська Г.В. Глибинна будова та альпійська геодинаміка Карпатського та Кримсько-Чорноморського регіонів України: автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 2019. 35 с.
- Рокитянский И.И., Ингеров А.И. Электромагнитные исследования Карпатской аномалии электропроводности. *Геофиз. журн.* 1999. Т. 21. № 4. С. 59—70.
- Смірнова О.М. Співставлення карти градієнтів швидкостей вертикальних рухів земної кори Карпатського регіону з геолого-геофізичними даними. Сучасні досягнення геодезичної науки і техніки: зб. наук. праць. Львів, 2002. С. 104—109.
- Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій: монографія. Ред. К.Р. Третяк, В.Ю. Максимчук, Р.І. Кутас. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2015. 420 с.
- Kulik, S.N. (2004). High conductivity anomalies in the Continental Earth's Crust. Proceedings of the institute of fundamental studies. Киев: Логос, С. 14—21.
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilyenko, V., & Shyrkov, B. (2021 a). Modern magnetotelluric researches of the Ukrainian Carpathians. *JGD*, 2(3), 92—101. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.092>.
- Kushnir, A., Pliencko, V., & Shyrkov, B. (2021 b). Seismicity of the Ukrainian Carpathians and their connection with anomalous electrical conductivity. *XV Міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища» 17—19 листопада 2021 р., Київ, Україна.*
- Rokityansky, I.I. (1982). *Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61801-7>.
- Rokitiansky, I.I., Amirov, V.K., Kulik, S.N., & Logvinov, I.M. (1975). The electrical conductivity anomaly in the Carpathians. *Acta geod., geophys. et mont. Hung*, 10, 277—286.
- Spratt, J.E., Jones, A.G., Jackson, V.A., Collins, L., & Avdeeva, A. (2009). Lithospheric geometry of the wopmay orogen from slave craton to be a province magnetotelluric transect. *Journal Geophysical Research*, 114. <https://doi.org/10.1029/2007JB005326>.
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Kováč, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedús, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>.
- Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, R., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Okoń, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaieva, O., Gryn, D., Mechie, J., & Tolkunov, A. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians — From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794, 228620. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228620>.
- Unsworth, M. (2008). Magnetotelluric studies of continent-continent collisions. Review paper.

- The 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth October 20—29, 2008, Beijing.*
- Characteristics and Implications for Physico-chemical State. *Surveys in Geophysics*, 26(6), 733—765.
- Varentsov, I.V. (2007). Array of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. Electromagnetic sounding of the Earth's interior. *Methods in geochemistry and geophysics*, 40, 259—273.
- Wannamaker, P. (2005). Anisotropy Versus Heterogeneity in Continental Solid Earth Electromagnetic Studies: Fundamental Response
- Wiese, H. (1965). *Geomagnetische Tiefentellurik*. Deutsche Akad. Wiss., Berlin, 146 p.
- Zhdanov, M.S., Golubev, N.G., Varentsov, I.M., Abramova, L.M., Shneer, V.S., Berdichevsky, M.N., Zhdanova, O.N., Gordienko, V.V., Bilinsky, A.I., & Kulik, S.N. (1986). 2D model fitting of a geomagnetic anomaly in the Soviet Carpathians. *Annales Geophysicae*, 4B(3), 335—342.

Modern geoelectromagnetic researches of the Ukrainian Carpathians

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

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

Based on the results of modern synchronous geoelectromagnetic studies, a spatiotemporal picture of the distribution of geomagnetic variations and the electric field on the Earth's surface, as well as an idea of the distribution of electrical conductivity and the geoelectric structure of the subsurface section of the southwestern Ukrainian Carpathians, was obtained. The experimental data were processed using the PRC_MTMV software package; the properties of response functions — tippers for periods of geomagnetic variations from 50 to 5000 s and curves of apparent electrical resistivity (amplitude values and impedance phases) from 10 to 1000 s were analyzed. The anomalies of electrical conductivity in the Earth's crust outlined as a result of a qualitative interpretation correspond to fault tectonics and create a chain of four local differently oriented sections, the common axis of which runs between the Transcarpathian and Chernogolovsky deep faults, and in the southern part between the latter and Uzhotsky (it is also possible to consider the option of a single longitudinally heterogeneous conductive structure within the concept of the axial zone of the Carpathian magnetovariational anomaly). An inhomogeneous distribution of electrical conductivity at the depths of the upper mantle was recorded in the Ukrainian Carpathian region from the Transcarpathian trough to the Skibov cover. It is shown that there is a general northeastern deepening of the upper edge from 40—60 km (Transcarpathian trough) to 90—100 km (Krosnensky cover) and its sharp subsidence in the zone of the Porkuletsky and Duklyansky covers. Three sections were distinguished along the strike of the inner and central zones of the Outer Carpathians: the northern one is characterized by a deepening of the upper edge and a branching of electrical conductivity along the depth towards the south; The obtained results of geoelectromagnetic studies are in good agreement with geothermal zoning, correspond to the structure of the lithosphere according to the DSS profiles and with ideas about the geodynamic development of the interior.

Key words: southwestern Ukrainian Carpathians, deep magnetotelluric sounding, magnetovariational profiling, electrical conductivity anomalies.

References

- Amashukeli, T.A. (2021). The structure of the lithosphere of the south-western margin of the East European Platform according to the wide-angle deep seismic soundings profiles. *Candidate's thesis*. Kyiv, 24 p. (in Ukrainian)
- Berdichevskiy, M.N., & Dmitriev, V.I. (2009). *Models and methods of magnetotellurics*. Moscow: Nauchnyy mir, 680 p. (in Russian).
- Burakhovich, T.K. (2004). Quasi 3D geoelectric model of the Carpathian region. *Geophysical Journal*, 26(4), 63—74 (in Russian).
- Burakhovich, T.K., & Kulik, S.N. (2009). Three-dimensional geoelectric model of the Earth's crust and upper mantle of the western part of the Ukrainian Shield and its slopes. *Geophysical Journal*, 31(1), 88—99 (in Russian).
- Krupskyy, Yu.Z. (Ed.). (2007). Geological map of the Ukrainian Carpathians. Transcarpathian, Ivano-Frankivsk, Lviv, Chernivtsi regions of Ukraine. 1 : 100 000. Compiled by V.V. Hlushko, B.B. Kuzovenko, V.Ye. Shlapinskyy. Report of CJSC Concern «Nadra». Kyiv, 228 p. (in Ukrainian).
- Glushko, V.V., & Kruglov, S.S. (Eds.). (1986). *Tectonic map of the Ukrainian Carpathians, scale 1 : 200,000*. Kyiv: Edition of the Mingeo of the Ukrainian SSR (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kovachikova, S., Logvinov, I.M., Tarasov, V.N., & Usenko, O.V. (2011). *Ukrainian Carpathians (geophysics, deep processes)*. Kiev: Logos, 129 p. (in Russian).
- Zhamaletdinov, A.A., & Kulik, S.N. (2012). First-rate anomalies of electro-conductivity on the Globe. *Geophysical Journal*, 34(4), 22—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v34i4.2012.116747> (in Russian).
- Zayats, Ch. (2013). *Deep structure of the subsoil of the Western region of Ukraine on the basis of seismic surveys and directions of exploration for oil-and-gas*. Lviv: Center of Europe, 136 p. (in Ukrainian).
- Kissin, I.G. (2006). Modern fluid regime of the Earth's crust and geodynamic processes. In *Fluids and geodynamics. Proceedings of the All-Russian Symposium* (pp. 85—104). Moscow: Nauka (in Russian).
- Kissin, I.G. (2001). *Fluid system and geophysical inhomogeneities of the consolidated Earth's crust of the continents* (pp. 4—19). Moscow: Publishing House of the Institute of Physics of the Earth RAS (in Russian).
- Kravchenko, A.P., & Sapuzhak, Ya.S. (1989). Geoelectric characteristics of the sedimentary cover of the Carpathian region. *Geophysical Journal*, 2(3), 73—78 (in Russian).
- Kutas, R.I. (2022). Deep degasation and oil-and-gas containment of the Eastern (Ukrainian) Carpathians: geodynamic and geothermal aspects. *Geophysical Journal*, 43(6), 23—41. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251551> (in Ukrainian).
- Kushnir, A.N., & Burakhovich, T.K. (2019). *Electrical conductivity of seismically active regions of Ukraine*. LAPLAMBERT Academic Publishing, 108 p. Retrieved from <https://www.morebooks.shop/store/gb/book/Электропровідність-сейсмоактивних-регіонів-України/isbn/978-613-9-45196-8> (in Russian).
- Murovska, G.V. (2019). Deep structure and alpine geodynamics of the Carpathian and Crimean-Black Sea regions of Ukraine. *Doctor's thesis*. Kyiv, 35 p. (in Ukrainian).
- Rokityansky, I.I., & Ingerov, A.I. (1999). Electromagnetic studies of the Carpathian anomaly of electrical conductivity. *Geophysical Journal*, 21(4), 59—70 (in Russian).
- Smirnova, O.M. (2002). Comparison of the map of gradients of velocities of vertical movements of the Earth's crust of the Carpathian region with geological and geophysical data. In *Modern achievements of geodetic science and technology: a collection of scientific papers* (pp. 104—109). Lviv (in Ukrainian).
- Tretyak, K.R., Maksimchuk, V.Yu., & Kutas, R.I. (Eds.). (2015). *Modern geodynamics and geophysical fields of the Carpathians and adjacent territories: monograph*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 420 p. (in Ukrainian).

- Kulik, S.N. (2004). High conductivity anomalies in the Continental Earth's Crust. Proceedings of the institute of fundamental studies. Київ: Логос, С. 14—21.
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilyenko, V., & Shyrkov, B. (2021 a). Modern magnetotelluric researches of the Ukrainian Carpathians. *JGD*, 2(3), 92—101. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.092>.
- Kushnir, A., Ilyenko, V., & Shyrkov, B. (2021 б). Seismicity of the Ukrainian Carpathians and their connection with anomalous electrical conductivity. *XV Міжнародна наукова конференція «Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища» 17—19 листопада 2021 р., Київ, Україна*.
- Rokityansky, I.I. (1982). *Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61801-7>.
- Rokityansky, I.I., Amirov, V.K., Kulik, S.N., & Logvinov, I.M. (1975). The electrical conductivity anomaly in the Carpathians. *Acta geod., geophys. et mont. Hung*, 10, 277—286.
- Spratt, J.E., Jones, A.G., Jackson, V.A., Collins, L., & Avdeeva, A. (2009). Lithospheric geometry of the wopmay orogen from slave craton to be a province magnetotelluric transect. *Journal Geophysical Research*, 114. <https://doi.org/10.1029/2007JB005326>.
- Starostenko, V., Janik, T., Kolomiyets, K., Czuba, W., Środa, P., Grad, M., Kováč, I., Stephenson, R., Lysynchuk, D., Thybo, H., Artemieva, I.M., Omelchenko, V., Gintov, O., Kutas, R., Gryn, D., Guterch, A., Hegedűs, E., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2013). Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics*, 608, 1049—1072. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.07.008>.
- Starostenko, V., Janik, T., Mocanu, V., Stephenson, R., Yegorova, T., Amashukeli, T., Czuba, W., Środa, P., Murovskaya, A., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Okoń, J., Dragut, A., Omelchenko, V., Legostaieva, O., Gryn, D., Mechie, J., & Tolkunov, A. (2020). RomUkrSeis: Seismic model of the crust and upper mantle across the Eastern Carpathians — From the Apuseni Mountains to the Ukrainian Shield. *Tectonophysics*, 794, 228620. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228620>.
- Unsworth, M. (2008). Magnetotelluric studies of continent-continent collisions. Review paper. *The 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth October 20—29, 2008, Beijing*.
- Varentsov, I.V. (2007). Array of simultaneous EM soundings: design, data processing and analysis. Electromagnetic sounding of the Earth's interior. *Methods in geochemistry and geophysics*, 40, 259—273.
- Wannamaker, P. (2005). Anisotropy Versus Heterogeneity in Continental Solid Earth Electromagnetic Studies: Fundamental Response Characteristics and Implications for Physicochemical State. *Surveys in Geophysics*, 26(6), 733—765.
- Wiese, H. (1965). *Geomagnetische Tiefentellurik*. Deutsche Akad. Wiss., Berlin, 146 p.
- Zhdanov, M.S., Golubev, N.G., Varentsov, I.M., Abramova, L.M., Shneer, V.S., Berdichevsky, M.N., Zhdanova, O.N., Gordienko, V.V., Bilinsky, A.I., & Kulik, S.N. (1986). 2D model fitting of a geomagnetic anomaly in the Soviet Carpathians. *Annales Geophysicae*, 4B(3), 335—342.