УДК 550.837:551.24

Антон КУШНІР[1a], Тетяна БУРАХОВИЧ[1b], Володимир ІЛЬЄНКО[1c], Богдан ШИРКОВ[1]

[1] Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, просп. Академіка Палладіна 32, Київ, 03680, Україна, ел. пошта: antonn@ukr.net; burahovich@ukr.net; ivageophysicist@gmail.com; bog dan90@ukr.net; [1a] https://orchid.org/0000-0003-1026-9268; [1b] https://orchid.org/0000-0002-3727-2363; [1c] https://orchid.org/0000-0002-9409-6968

https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.092

СУЧАСНІ МАГНІТОТЕЛУРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Для дослідження глибинної будови південного заходу Українських Карпат, де розташована Карпатська аномалія електропровідності, в 2015 та 2020 рр. проведено сучасні синхронні магнітотелуричні дослідження за профілями: Мукачеве – Сколе, Середнє – Бориня та Карпатський в двадцяти трьох пунктах. Отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій та електричного поля на поверхні Землі, за якою можна оцінити електропровідність та геоелектричну структуру регіону. Експериментальні матеріали опрацьовано за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV, що забезпечує спільне перешкодозахищене оцінювання імпедансу за синхронними магнітотелуричними записами. Отримано надійні криві позірного питомого електричного опору (амплітудних значень та фаз імпедансу) від 10 до 10000 с. Спільний аналіз кривих позірного питомого електричного опору і фаз імпедансу та формальна інтерпретація кривих глибинного магнітотелуричного зондування із використанням трансформації Ніблетта вказують на наявність просторово неоднорідного провідника як у земній корі, так і у верхній частині верхньої мантії. Ланцюг локальних електропровідних ділянок у земній корі збігається із осьовою частиною Карпатської аномалії електропровідності. Високу електропровідність верхньої мантії зафіксовано в Українських Карпатах від Закарпатського прогину до Скибових покривів. Показано, що вона не є однорідним шаром, спостерігається загальне поглиблення верхньої кромки на північний схід від 40–60 км (Закарпатський прогин) до 90–100 км (Кросненського покриву), а також різке поглиблення вздовж Поркулецького та Дуклянського покривів. Інформація про існування глибинного провідника та його параметри повинна стати основою для кількісної інтерпретації та побудови 3D глибинної геоелектричної моделі.

Ключові слова: південний захід Українських Карпат; Карпатська аномалія електропровідності; глибинне магнітотелуричне зондування; аномалії електропровідності.

Вступ

Розподіл електричних властивостей (наприклад, електропровідності) в земній корі та верхній мантії за останні десятиліття визначено переважно у результаті глибинних магнітотелуричних (МТ) зондувань (ГМТЗ), основаних на вимірюванні магнітних і електричних компонент природного низькочастотного електромагнітного поля Землі.

Високу електропровідність геологічних структур в окремих локальних ділянках Землі можна пояснити такими причинами:

– високою електронною провідністю рудних мінералів, графіту тощо;

– високою іонною провідністю мінералізованих флюїдів, що заповнюють пори міжзернового простору та тріщини у гірських породах Землі. Ці флюїди можуть утворюватися в результаті метаморфізму і дегідратації порід під дією високих температур, що виникли під час новітніх тектонічних процесів;

– частковим плавленням порід кори і верхньої мантії;

– комбінацією всіх описаних вище причин або їх частинами.

На території України та за її межами широко відома та добре описана у науковій літературі Карпатська аномалія електропровідності, протяжність якої сягає кількох сотень кілометрів. Вперше її виявлено ще у 1963 р. під час унікальних досліджень варіацій геомагнітного поля та проаналізовано аномальні локальні значення їх амплітуд [Wiese, 1963]. З цього часу розпочалося стрімке вивчення електропровідності глибинних горизонтів земної кори та мантії Карпатського регіону. Чудові результати експериментального картування, інтерпретації та тлумачення можливих причин високої електропровідності ранніх досліджень опубліковано в “Geoelectric and Geothermal studies KAPG Geophysical monography” (КАПГ геофізичній монографії, 1976) [Adam, 1976], а також у 1984 р. у спеціальному виданні журналу “Acta Geadatica” [Acta…, 1984].

Цю територію неодноразово вивчали багато дослідників-геоелектриків із Угорщини, Чехії,

 © А. Кушнір, Т. Бурахович, В. Ільєнко, Б. Ширков

Польщі, України, Румунії, Словаччини та Росії. Отримано сотні значень індукційних параметрів і кривих МТЗ. Максимальна кількість пунктів зосереджена в районі осі Карпатської та Трансданубської аномалій. Основні результати свідчать про складну глибинну будову та дали змогу виділити численні електропровідні об'єкти в земній корі та мантії досліджуваного регіону.

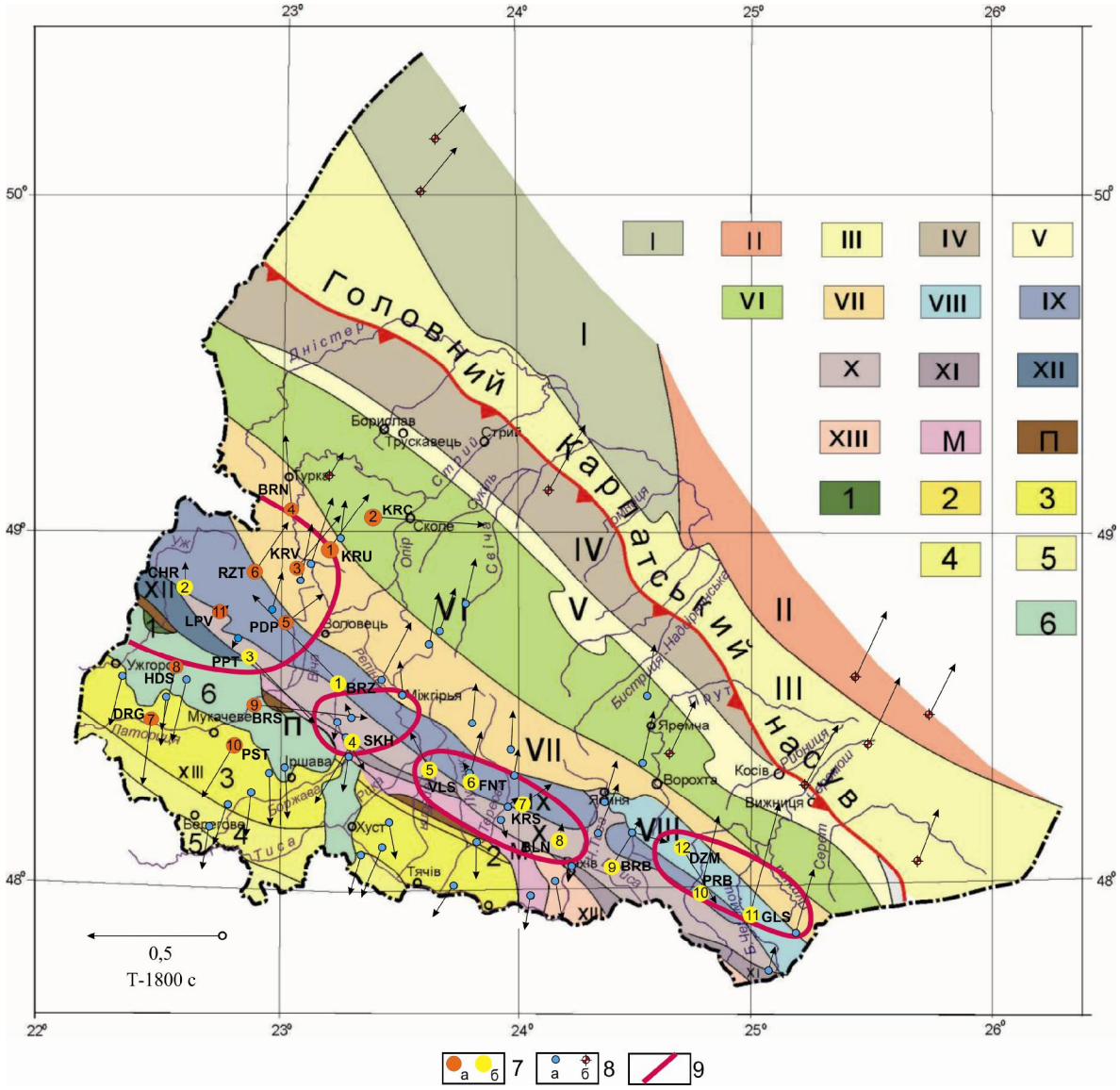


Рис. 1. Схема розташування пунктів МВП і ГМТЗ та аномальні зони за результатами якісної інтерпретації електромагнітних даних (2015 та 2020 рр.) на схемі тектонічного районування Українських Карпат за [Глушко, Круглов, 1986]:

I – Західноєвропейська платформа; II – Східноєвропейська платформа; III – Передкарпатський прогин; IV – Самбірський покрив, V – Бориславсько-Покутський покрив, VI – Скибовий покрив, VII – Кросненський покрив; VIII – Чорногорський покрив; IX – Дуклянський 82 покрив; X – Поркулецький покрив; XI – Рахівський покрив; XII – Магурський покрив; XIII – Мармароський масив; M – зона Мармароських кліпів; П – зона П'єнінських кліпів. Закарпатський прогин (ЗП) та його зони: 1 – Підгалля; 2 – Крайова; 3 – Центральна; 4 – Припаннонська; 5 – Паннонська западин; 6 – Вигорлат-Гутинська вулканічна гряда; 7 – пункти спостереження: а) 2015 та б) 2020 рр.; 8 – пункти спостереження попередніх дослідників: а) за даними [Рокитянский, Ингеров, 1999; Третяк та ін., 2015]; б) за даними [Гордиєнко и др., 2011]; 9 – аномалії електропровідності, виділені в результаті якісної інтерпретації даних ГМТЗ

Останні найповніші огляди на підставі раніше виконаних електромагнітних досліджень Карпатського регіону України можна знайти в публікації [Бурахович, 2004] та спеціальних розділах монографій [Гордиенко и др., 2011, Третяк та ін., 2015]. Питання можливого зв'язку між сейсмічністю

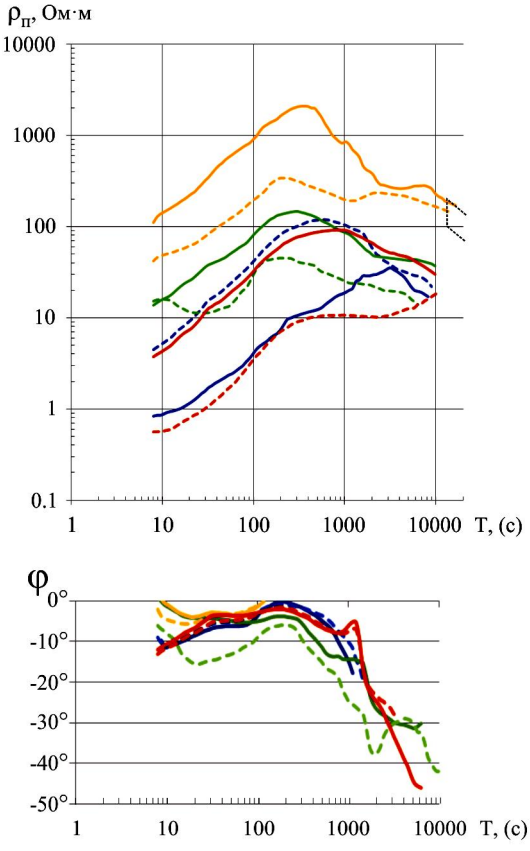
Східних Карпат і геоелектричними параметрами земної кори стосуються статті [Kováčiková, et al., 2016, 2019].

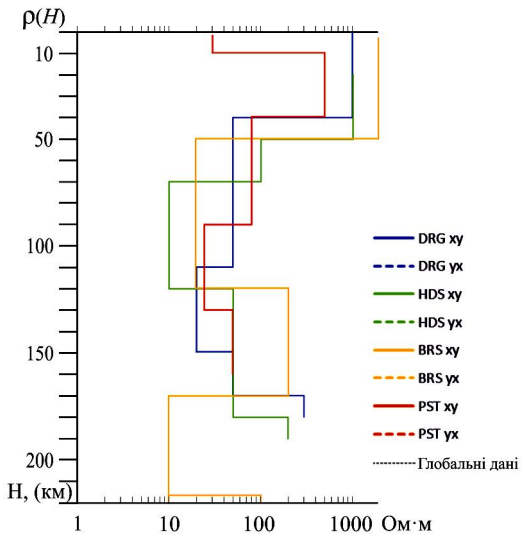
Попри детальну багатосторонню геоелектромагнітну вивченість Українських Карпат, коло невирішених питань, які стосуються визначення природи та глибини залягання верхньої кромки аномалії, а також побудови глибинної тривимірної моделі надр за сучасними експериментальними геоелектромагнітними даними, залишається відкритим та актуальним. Частково такі завдання обгрунтовано для подальших досліджень у підсумках до розділу "Аномалії електропровідності у Центральній Європі" [Третяк та ін., 2015, с. 319].

Мета цієї статті – аналіз сучасних експериментальних ГМТЗ досліджень Українських Карпат, виявлення на якісному рівні параметрів аномалії високої електропровідності, які стануть основою для побудови тривимірної глибинної моделі.

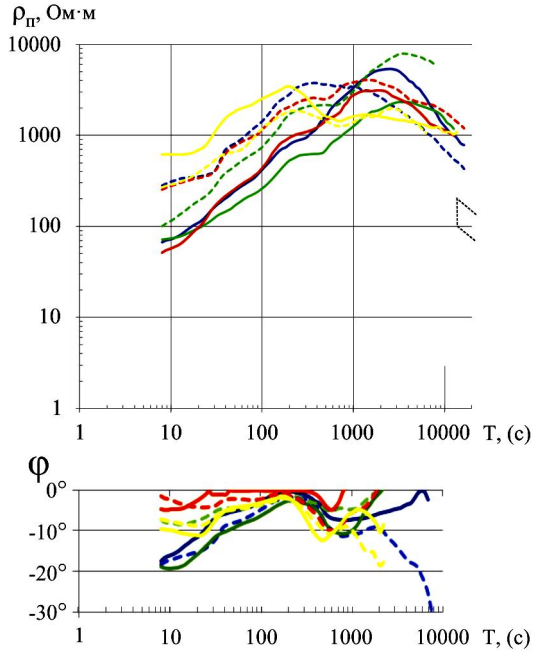
Сучасні експериментальні дослідження ГМТЗ (2015 та 2020 рр.)

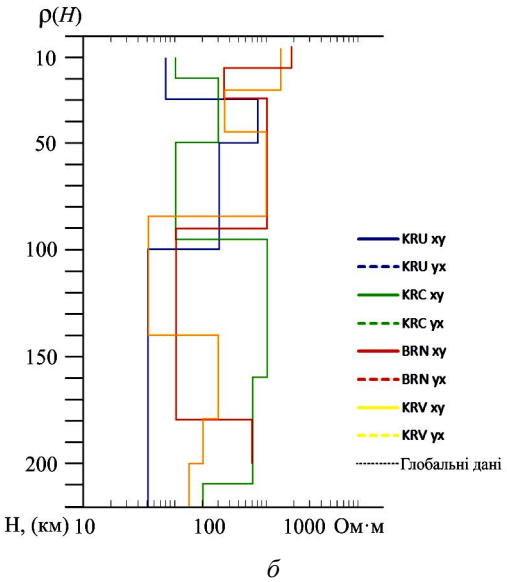
Усі польові експерименти виконано за методикою синхронного спостереження МТ/МВ полів із використанням двох довгоперіодних цифрових апаратурних комплексів серії LEMI-417 із феррозондовими магнітометрами, надзвичайно ефективних під час глибинних зондувань земної кори і верхньої мантії. Синхронізацію станцій здійснено за допомогою GPS приймача.



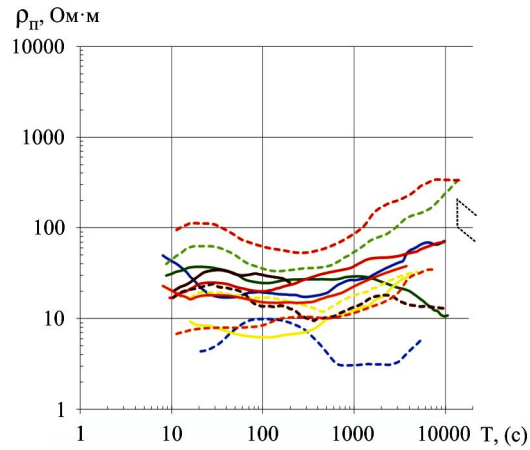


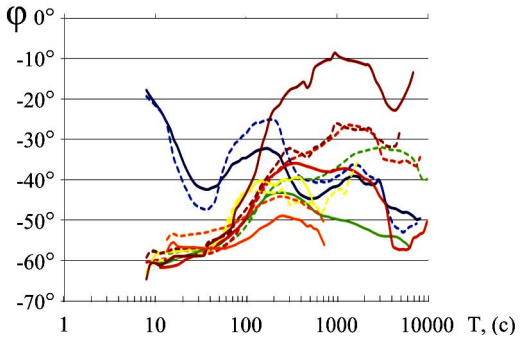
а

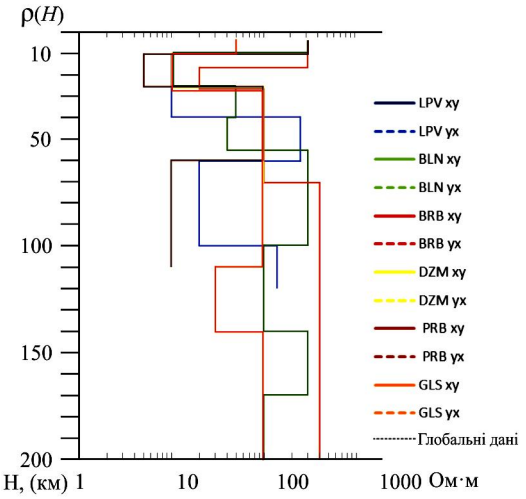




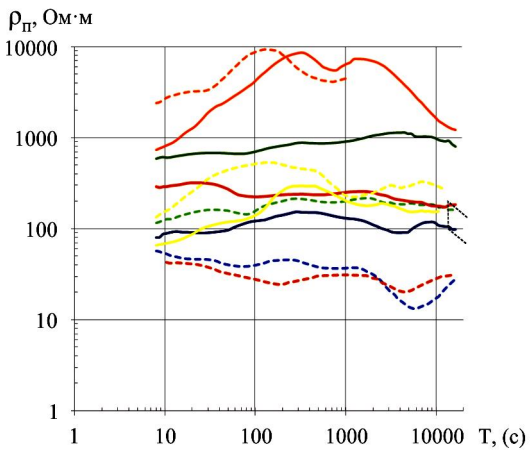
б

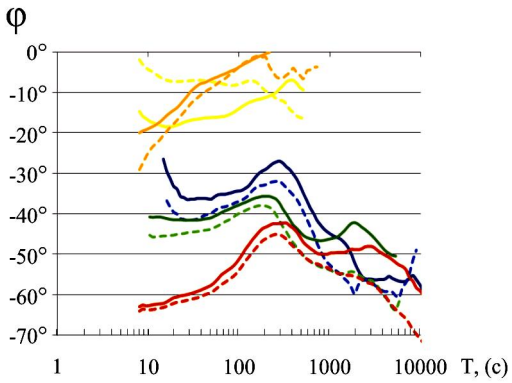

ρп, Ом·м
10000
1000
100
10
1
1
10
100
1000
10000
T, (c)

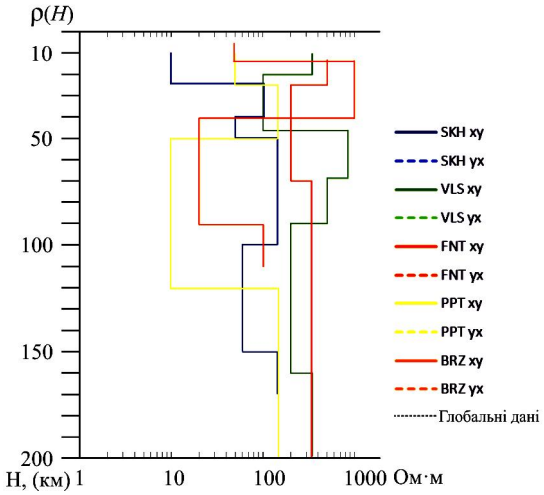

φ
0°
-10°
-20°
-30°
-40°
-50°
-60°
-70°
1
10
100
1000
10000
T, (c)


ρ(H)
10
50
100
150
200
H, (км)
1
10
100
1000 Ом·м
LPV xy
LPV yx
BLN xy
BLN yx
BRB xy
BRB yx
DZM xy
DZM yx
PRB xy
PRB yx
GLS xy
GLS yx
Глобальні дані

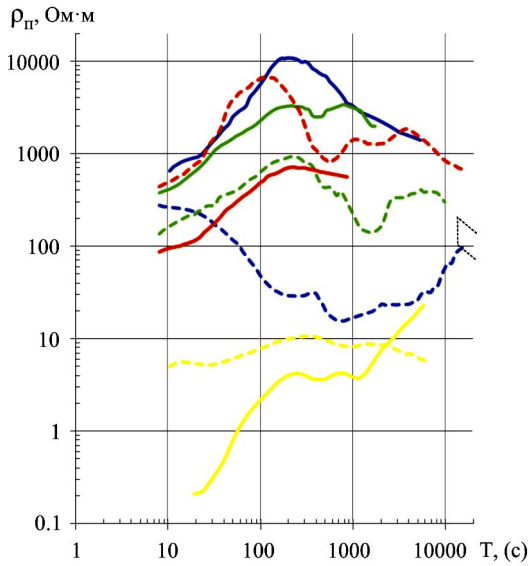
в

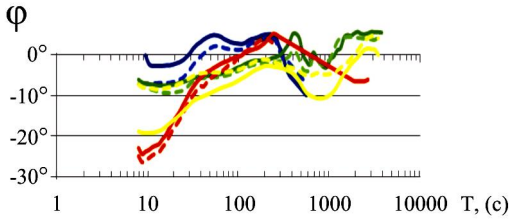

ρп, Ом·м
10000
1000
100
10
1
1
10
100
1000
10000
T, (c)


φ
0°
-10°
-20°
-30°
-40°
-50°
-60°
-70°
1
10
100
1000
10000
T, (c)


ρ(H)
10
50
100
150
200
H, (км)
1
10
100
1000 Ом·м
SKH xy
SKH yx
VLS xy
VLS yx
FNT xy
FNT yx
PPT xy
PPT yx
BRZ xy
BRZ yx
Глобальні дані

г


ρп, Ом·м
10000
1000
100
10
1
0.1
1
10
100
1000
10000
T, (c)


φ
0°
-10°
-20°
-30°
1
10
100
1000
10000
T, (c)

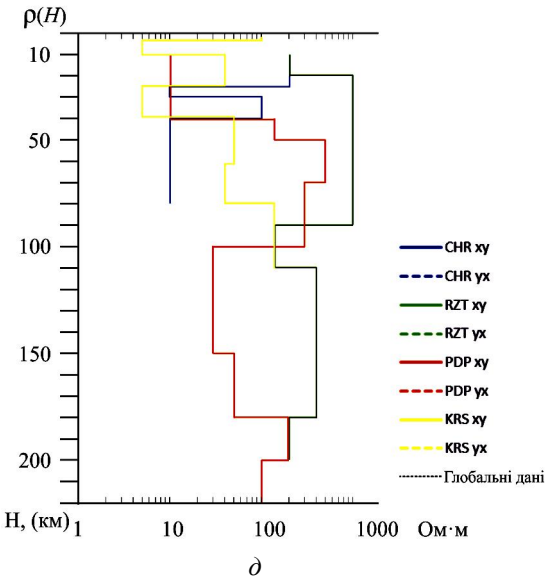


Рис. 2. Експериментальні криві ГМТЗ, отримані за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV:

ρ_{xy} – північ–південь; ρ_{yx} – захід–схід; φ – фази імпедансу: φ_{xy} – північ–південь; φ_{yx} – захід–схід; трансформації Ніблетта ρ(H) за ефективними амплітудними кривими ρ_n

Експериментальні спостереження МТ/МВ полів здійснено на території західної частини Українських Карпат (рис. 1): у 2015 р. – вхрест тектонічних структур – уздовж двох профілів Мукачеве – Сколе та Середнє – Бориня в кількості 11 пунктів (відстань між пунктами становила 10–15 км), у 2020 р. – вздовж західної частини в межах відомої Карпатської аномалії електропровідності [Рокитянский, Ингеров, 1999; Zhdanov et al,1986; Бурахович, 2004; Гордиєнко и др., 2011], профілю Карпатський – 12 пунктів (відстань між ними становила 20–30 км). Спостереження в польових точках вели від 3 до 12 діб.

Більшість сучасних методів оцінювання передавальних операторів основані на загальних принципах гармонічного аналізу і робастних способах лінійного оцінювання у частотній області. Після відбракування некондиційних записів та придушення завад (препроцесинг) виконано 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 розв'язували частинами із подальшим осередненням чи цілком. Такий підхід реалізовано за допомогою програмного комплексу PRC_MTMV, який розробив І. М. Варенцов [Varentsov, 2007]. Завдяки сучасному підходу до опрацювання експериментальних синхронних МТ/МВ зондувань одержано криві ГМТЗ (амплітудні та фазові позірного питомого опору ρ_n) для широкого діапазону періодів геомагнітних варіацій 10–10000 с у різних тектонічних структурах Українських Карпат (рис. 2, *а–д*).

Незважаючи на сучасні підходи до оброблення, більшість кривих ГМТЗ отримано зі значним розкидом за ρ_n (подекуди декілька порядків) на періодах, більших за $5{\cdot}10^3$ с. Ще у спостереженнях 1976 р. [Третяк та ін., 2015] розкид поперечних імпедансів був таким, що унеможливив побудову кривої МТЗ. З іншого боку, відомо, що на періодах понад 1000 с спостерігається значна дисперсія значень ρ_n і фази імпедансу (φ). Невеликі значення імпедансу в цьому діапазоні є причиною малої амплітуди варіацій природного електричного поля, що, відповідно, спричиняє низьку точність оцінок.

Періоди варіацій близько 10000 с певною мірою можна вважати критичними, оскільки глибина проникнення електромагнітного поля в провідну Землю стає співрозмірною з геометричними розмірами самих струмових систем, які слугують джерелом варіацій. Тому, якщо для індукційних зондувань використано довгі періоди, виникає необхідність врахування просторової структури джерела поля, тобто зміни методів зондувань або інших теоретичних підходів до електромагнітних методів. Класичні МТ/МВ оператори, як правило, часткові й наближені, реалізуються тільки із дотриманням обов'язкових вимог до структури первинного поля.

Отже, район дослідження можна вважати доволі складним у плані отримання задовільного експериментального матеріалу. На заваді стають значні техногенні впливи, спричинені електрифікованими залізницями, нафтогазопровідними транспортними системами та їх катодним захистом.

Спочатку проаналізуємо та виділимо зони за типами кривих ГМТЗ, тобто за формою та рівнем ρ_n, співвідношенням кривих для різних (ρ_{xy} – північ–південь, ρ_{yx} – захід–схід) напрямків та виходом на глобальні дані (рис. 2, *а–д*).

Так, криві ρ_n (DRG, HDS, BRS, PST) у Закарпатському прогині (рис. 1; 2, *а*) вирізняються висхідною гілкою на періодах до $3{\cdot}10^2$–10^3 с, максимум сягає 50–500 Ом·м, зі збільшенням періоду ρ_n знижується, мінімум спостерігається на $5{\cdot}10^3$ с. Криві зазнають гальванічних спотворень, їх рівень нижчий за характерний для глобальних даних. Розходження кривих за напрямками спостерігається майже у всьому частотному діапазоні та не перевищує одного порядку. Фаза імпедансу в інтервалах частот, що відповідають висхідній та низхідній гілкам, наближається до нуля (її розраховують з великою точністю) та прямує до -90^0 (зі збільшенням періоду точність знижується, іноді значення φ проходить через всі квадранти, здійснюючи майже повний оберт), відповідно. Тобто виконуються дисперсні співвідношення для трансформації кривих ρ_n у φ для одновимірної

моделі Тихонова – Кан'яра. Відомо, що на періодах до максимуму маємо інформацію про інтегральну електропровідність верхнього шару, а за більших – про глибину до електропровідної основи. Таку поведінку кривих ГМТЗ можна пояснити сумісним впливом електропровідних приповерхневих осадових товщ (S_{oc} від 250 до 1000 См) та високою провідністю астеносферного шару.

Криві групи ρ_n (KRU, KRC, BRN, KRV) у північній частині Українських Карпат (рис. 2, *в*) також мають висхідну гілку до періодів більш ніж 10^3 с, яка ускладнена незначними мінімумами, максимальний рівень ρ_n не перевищує 10^4 Ом·м, всі криві лежать на порядок вище за глобальні дані, розходження за напрямками не перевищує половини порядку, зростає на періодах понад $3\cdot10^3$ с. Фаза імпедансу має аналогічні особливості, як і у попередній групі кривих ГМТЗ, і це можна пояснити сумісним впливом приповерхневих осадових товщ з S_{oc} від 100 до 500 См та високою провідністю шарів на різних глибинних H.

Групу кривих ρ_n (LPV, BLN, BRB, DZM, PRB, GLS), розташованих у різних частинах Українських Карпат, здебільшого на півдні (рис. 1; 2, *в*), об'єднують такі особливості: відсутня висхідна гілка на коротких періодах, спостерігається затяжний мінімум на періодах від 30 до $2–5\cdot10^3$ с амплітудою до половини порядку, рівень ρ_n до 10^2 Ом·м, деякі криві виходять на глобальні дані, інші лежать нижче. Розходження кривих: пункт LPV – майже на порядок у всьому частотному діапазоні, BLN – до двох порядків на періодах понад 1000 с. Фази імпедансу на коротких періодах для двох напрямків менші за –45º та сягають значень –75º, різниця φ для різної поляризації переважно спостерігається на періодах, більших за 300–700 с, та становить 45º. І хоча більшість кривих φ розраховано з незадовільною точністю, якісно вони відповідають амплітудним кривим ρ_n. Всі пункти розташовані у зоні незначної S_{oc} – до 100 См, із ймовірними провідниками в надрах.

У центральній частині півдня Українських Карпат можна виділити дві групи типів кривих ГМТЗ (рис. 2, *г*). Перша група – криві у пунктах SKH, VLS, FNT – характеризується відсутністю висхідної гілки, майже витриманим у всьому частотному діапазоні рівнем ρ_n (відповідно до кожного пункту ρ_{xy} змінюється від 100 до 1000 Ом·м, ρ_{yx} – від 30 до 200 Ом·м). Зрозуміло, що криві ГМТЗ розходяться майже на порядок на всіх періодах, і тому складно однозначно проаналізувати їх положення щодо глобальних даних (переважно вони лежать нижче, але іноді вище чи виходять на рівень 100–200 Ом·м на періодах понад 10^4 с). До того ж на різних частотних діапазонах спостерігаються незначні коливання за ρ_n. Значення φ менші за –45º, розходження за напрямками поляризації в середньому 10º, іноді 80º (VLS на періоді більше за 5000 с), загалом похибки зростають на періодах, більших за 700 с. Друга група – криві у пунктах PPT, BRZ – незначна висхідна гілка до 100 с, наявність явно вираженого мінімуму на періодах 500–1000 с, криві за напрямками кілька разів перетинаються на різних періодах, загалом лежать вище від глобальних даних. Перша частина кривої φ має значення на рівні до –20º на періодах, менших за 200 с, зі збільшенням періоду різко зростає значення похибки, що унеможливлює інтерпретацію. На розглянутих ділянках S_{oc} не перевищує 100 См. Розходження кривих та мінімумів на різних періодах може свідчити про підвищену аномальну електропровідність на різних глибинах.

У західній частини Українських Карпат можна виділити два пункти CHR та RZT, у яких криві за напрямками характеризуються поступовим розходженням (рис. 2, *д*), яке зі збільшенням періоду зростає та сягає трьох порядків. Низхідна крива ρ_{yx} ускладнена значним мінімумом на періодах 1000–3000 с та виходить на рівень, нижчий за глобальні дані. Висхідна ρ_{xy} крива має загальний рівень $10^3–10^4$ Ом·м, мінімуми на цих самих періодах та вищий за глобальні дані рівень. Така поведінка кривих характерна для протяжних розломних структур. Фази імпедансу впевнено будуються до 200 с і на цих періодах відповідають кривим ρ_n. Надалі точність знижується, значення проходять через всі квадранти, здійснюючи майже повний оберт φ. Ділянка характеризується S_{oc} до 200 См.

Своєрідною відсутністю конформності характеризуються криві ГМТЗ у пунктах PDP та KRS, розташованих у різних частинах Дуклянського покриву Українських Карпат, хоча S_{oc} однакова і становить до 100 См (рис. 2, *д*). Криві ρ_n за напрямками у пункті PDP істотно вирізняються за формою та кілька разів перетинаються на різних періодах: ρ_{xy} має висхідну гілку із максимумом близько 700 Ом·м на періоді 300 с та пологу низхідну частину, що виходить на рівень глобальних даних; ρ_{yx} притаманні значні градієнти за ρ, кілька максимумів (до 6000 Ом·м) та мінімумів (від 100 Ом·м) на різних періодах, лежать на один порядок вище від глобальних даних.

У пункті KRS криві ρ_n за напрямками не конформні: ρ_{yx} має майже пологу форму та міститься у інтервалі поміж 4÷12 Ом·м із незначними перегинами на періодах 30 та 1000 с; ρ_{xy} характеризується різною поведінкою у відповідних частотних діапазонах: 10÷200 с – добре проявлений мінімум $2\cdot10^{-1}$ Ом·м на періоді 20 с, 200÷1200 с – незначні флуктуації за ρ на рівні 4 Ом·м, 1200÷8000 с – висхідна гілка до 25 Ом·м, яку можна враховувати під час інтерпретації, ≥ 8000 с – висхідна гілка зі значним градієнтом за ρ може відображати, по-перше, неприродний характер, та бути пов'язаною із впливом техногенних факторів, або по-друге, недовраховуванням неоднорідності джерела природного електромаг-

нітного поля і сферичної симетрії Землі, та неприпустимістю обробки спостережених даних, у межах моделі Тихонова – Кан'яра.

Можливо, є структури, які створюють ρ_n та φ, що не пов'язані між собою перетворенням Гілберта. Існують приклади, коли виявлено порушення дисперсного співвідношення, яке характерне для моделей суперпозицій структур, які містять локальну приповерхневу неоднорідність над глибинною регіональною структурою [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Незважаючи на синхронний польовий запис та двоточкове опрацювання, отримані криві ГМТЗ складні, тому індивідуальна інтерпретація ускладнена.

Формальна інтерпретація кривих ГМТЗ

У розрахунках застосовано трансформації Ніблетта, або так звані перетворення кривих ρ_n (T) на криві, що визначають залежність опору від глибини ρ (H), де опір ρ і границя H – не істинні, а наближені величини ("діючі"). Трансформація Ніблетта основана на припущеннях, що

$$S = 1/\sqrt{\rho_T \omega \mu_0}\ ,\ H = \sqrt{\rho_T}\ /\sqrt{\omega \mu_0}\ .$$

Найповніший за глибиною геоелектричний розріз можна отримати з 1D інверсії узагальнених кривих зондувань, побудованих поєднанням кривих магнітоваріаційного зондування на опорній геомагнітній обсерваторії Львів [Semenov et al., 1996] із польовою кривою ГМТЗ. Параметри формальної інтерпретації за трансформацією Ніблетта ефективних амплітудних кривих ρ_n подано у нижніх частинах (рис. 2, *а–д*).

Перша група кривих ГМТЗ у пунктах DRG, HDS, BRS, PST (Закарпатський прогин) характеризується серією глибинних інтервалів низького ρ (рис. 2, *а*). Перший електропровідний шар проявився в інтервалі глибин (Н): 3–4÷10 км з ρ = =30–60 Ом·м (S = 100–200 См) – пункт PST; 10–20 км з ρ = 80 Ом·м (S =125 См) – пункт HDS; відсутній – пункт BRS. Швидше за все, цей електропровідний шар відповідає високій провідності поверхневих осадових відкладів із S_{oc} від 250 до 1000 См у межах Чоп-Мукачівської западини та у верхньому шарі понижених швидкостей V_p = 6÷6,2 км/с [Муровська, 2019]. Тільки пункт HDS (Вигорлат-Гутинська вулканічна гряда) за глибиною може бути приурочений до крайової частини Карпатської аномалії.

Другий електропровідний шар передбачається в Н: 40–70÷120–170 км з ρ = 10–80 Ом·м. В межах Чоп-Мукачівської западини він внутрішньо неоднорідний (розшарований), а саме на глибинах 90–110÷130–150 км ρ зростає у два – три рази до 20–25 Ом·м. У зоні Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди верхня кромка шару поглиблюється до 50–70 км, S становить 3500–5000 См. Можливе існування ще одного шару у верхній частині верхньої мантії (пункт BRS) на глибинах 170–220 км з ρ = 10 Ом·м (S = 5000 См). Отже, у верхній мантії виділяється астеносфера, яка може бути представлена не одним однорідним шаром на глибині 70–170 км з ρ = 25 Ом·м, а розшарованою структурою як по глибині, так і за ρ.

У земній корі за даними трансформацій кривих ρ_n у пунктах KRU, KRC, BRN, KRV (північна частина Українських Карпат) (рис. 2, *б*) виявлено шар високої електропровідності із Н 10–45 км, потужністю 10–20 км, з ρ від 50 до 350 Ом·м (рис. 2, *в*). Майже повсюдно проявилася астеносфера із верхньою кромкою на глибині 90–100 км, потужністю 50–150 км, з ρ від 50 до 100 Ом·м, S від 900 до 3000 См. Звернемо увагу на результат якісної інтерпретації у пунктах KRC та BRN, які є найпівнічнішими від осі Карпатської аномалії. Отримані параметри астеносфери у пункті KRC (50–90 км з ρ = 100 Ом·м (S = 400 См)) можна вважати дискусійними, враховуючи роздільну здатність методу, а саме порівняно високу сумісну провідність: приповерхневу S_{oc} близько 200 См та у земній корі понад 200 См (внесок аномальної частини до 100 См). Інша картина із отриманими геоелектричними параметрами спостерігається у пункті BRN, де дуже низька S, як у земній корі до 60 См, так і у верхній мантії до 900 См. Тобто складається враження, що у надрах під останніми пунктами відсутні аномальні зони, а інтерпретаційні параметри відображають боковий вплив неоднорідного розподілу електропровідних структур. Але таке припущення необхідно перевірити результатами розрахунку тривимірної геоелектричної моделі.

Пункти CHR, LPV (рис. 2, *в*) та PDP об'єднано в одну групу за результатами якісної інтерпретації даних МВП, які дають інформацію про Карпатську аномалію електропровідності (рис. 2, *д*). У земній корі майже у всіх пунктах виявлено провідник із верхньою кромкою від 10 км, потужністю 10–30 км, з ρ від 10 до 200 Ом·м. Винятком можна вважати пункти CHR та RZT, де верхня кромка поглиблюється до 20–25 км з ρ 10 Ом·м. Спостерігаються значні розбіжності у розташуванні верхньої кромки астеносфери: CHR, LPV – 40 та 60 км, потужність 20 км; RZT, PDP – 90 та 100 км, потужністю від 20 до 50 км. Майже у всіх пунктах S астеносфери становить від 1600 до 4000 См (істотно низькою S характеризується пункт RZT). В останньому такі низькі значення S, як у земній корі до 50 См, так і в мантії – 130 См, можуть свідчити про ослаблення впливу аномалії електропровідності на спостережені значення. Наведені геоелектричні параметри вказують, що на короткій відстані 10–30 км вздовж структури різко поглиблюється верхня кромка астеносфери: на північ з 60 до 90 км та на південь з 60 до 100 км.

За південною межею Карпатської аномалії опинився пункт PPT (рис. 1; 2, *г*), за геоелектричними параметрами аналогічний до HDS (рис. 2, *а*):

у земній корі – 10–25 км з ρ = 50 Ом·м (S = 300 См), у верхній мантії – 50–120 км з ρ = 10 Ом·м (S = =7000 См). Тобто незначні S у земній корі на фоні 3000 См, характерні для цих глибин в границях аномалії, можна пояснити приуроченням до її крайової частини або її боковим впливом на параметри у пунктах PPT та HDS. Намічається підйом верхньої кромки астеносфери до 50 км та збільшення S в 1,5–3 рази порівняно із параметрами, характерними для Закарпатського прогину та Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди.

Формальна інтерпретація із застосуванням трансформації Ніблетта (рис. 2, *г*) виявила у пункті BRZ аномалію із H 5–12 км та ρ = 50 Ом·м (S = 200 См), яка, вірогідно, відображає електропровідність поверхневих осадових товщ, а у пункті SKH це вже H 10–25 км у консолідованій земній корі, крім того, S сягає 750 См та значно перевищує $S_{ос}$ (до 100 См). Відмінність спостерігається і на більших глибинах у верхній мантії. У першому пункті продовжується підйом верхньої кромки астеносфери до 40 км, яка представлена єдиним шаром потужністю 50 км з ρ = 20 Ом·м (S = 2500 См. Підкреслимо, що тут S знижується майже утричі відносно пункту PPT). У другому – наявні кілька глибинних мантійних інтервалів: 40–60 км з ρ = 50 Ом·м та 100–150 км ρ = 60 Ом·м, але їх загальна S менша та сягає 1200 См.

Далі за Карпатським профілем (рис. 1; 2, *г*) спостерігається занурення аномалій у земній корі та верхній мантії у пунктах VLS (H 20–45, ρ = 100 Ом·м, S = 250 См; 90–160, ρ = 200 Ом·м, S = 400 См) та FNT, де вона представлена у надрах єдиним слабкопровідним горизонтом: H 25–70, ρ = 200 Ом·м, S = 250 См. Можна припустити, що саме тут виклинюється астеносфера Закарпатського прогину та півночі Українських Карпат і максимально занурюється верхня кромка південної локальної структури Карпатської аномалії.

Південніше за профілем у пунктах KRS, BLN (рис. 1; 2, *в, д*) знову з'являється локальна розшарованість за електропровідністю надр регіону, підйом верхньої кромки аномалій у земній корі (від 25 до 10 км, потужність 15 км, ρ = 5–10 Ом·м, S = 1500–3000 См) та верхній частині верхньої мантії (від 40 до 65 км, потужність 15 км, ρ = 40 Ом·м, S = 400 См). Розподіл ускладнюється локальними аномаліями в осадовій товщі (3–7 км, ρ = 5 Ом·м, S = 800 См) у пункті KRS та верхній мантії (100–140 км, ρ = 100 Ом·м, S = =400 См) у пункті BLN.

Наступні два пункти BRB, DZM (рис. 2, *в*) відрізняються наявністю тільки аномалії у земній корі, що характеризується різними геоелектричними параметрами: H 18–25 км та 7–27 км, ρ = 10–20 Ом·м, які формують суттєво різні значення S – 350 та 2000 См, відповідно. Аналізуючи, можна припустити, що пункт BRB міститься за межами аномалій чи під їх індукційним впливом, а пункт DZM може бути початком нової локальної електропровідної структури на півдні Українських Карпат. Вона добре проявилася у пунктах PRB та GLS, де отримано майже однакові геоелектричні параметри у земній корі: 10–30 км, ρ = 5–10 Ом·м, S = 2000–2400 См. Аномалію на астеносферних глибинах можна розглядати як впровадження із півдня або вертикальне проникнення, бо верхня кромка занурюється із 60 (PRB) до 110 км (GLS) на відстані до 25 км, потужність 30–50 км, S від 1000 до 5000 См.

Прикінцевий результат інтерпретації експериментальних даних та побудови глибинної моделі Карпатського регіону на їх основі необхідно отримувати тільки на підставі розрахунків тривимірного моделювання електромагнітного поля Землі.

Розподіл аномальної електропровідності в надрах Карпатського регіону за даними ГМТЗ

На підставі якісної інтерпретації амплітудних і фазових кривих ГМТЗ та аналізу геоелектричних параметрів, отриманих за трансформаціями Ніблетта, можна виділити аномальні зони в надрах Карпатського регіону (рис. 1).

У земній корі

– південний захід Українських Карпат (частини Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди, Магурського, Поркулецького, Дуклянського та Кросненського покривів). Передбачається локальна ізометрична за площею електропровідна ділянка. Просторово збігається із розташуванням Карпатської аномалії електропровідності за даними [Рокитянский, Ингеров, 1999; Гордиєнко и др., 2011; Бурахович, 2004; Третяк та ін., 2015];

– центральна частина Українських Карпат (переважно частина Поркулецького покриву). Передбачається вузька зона, спрямована вздовж загального напрямку м. Міжгір'я – м. Мукачеве, що проявилась як різними типами кривих ГМТЗ, так і неоднорідним розподілом за ρ;

– південний схід Українських Карпат (переважно частини Дуклянського, Поркулецького, Рахівського покривів та Мармароського масиву). Можливе існування локальних ділянок із перетисканням вздовж лінії м. Рахів – м. Ясеня. Потребує перевірки варіант також двох просторово відокремлених ділянок: єдиної витягнутої структури, що збігається з осьовою частиною Карпатської аномалії, за даними [Рокитянский, Ингеров, 1999; Гордиєнко и др., 2011; Бурахович, 2004; Третяк та ін., 2015], та локальної (переважно частини Чорногорського, Дуклянського та Поркулецького покривів).

У верхній мантії

– астеносферу зафіксовано в регіоні Українських Карпат від Закарпатського прогину до Скибових покривів;

– астеносфера не є однорідним шаром; трапляються ділянки як з однорідним шаром, так і ускладнені різним опором всередині нього, крім того, виявлено двошарові ізольовані структури;

– спостерігається загальне поглиблення верхньої кромки астеносфери на північний схід: від 40–60 км (Закарпатський прогин) до 90–100 км (Кросненського покриву). Різке поглиблення вздовж Поркулецького та Дуклянського покривів;

– варіювання верхньої кромки астеносфери та її гальванічні розриви можливі вздовж простягання внутрішньої та центральної зон Зовнішніх Карпат. Виділено три ділянки: північна – до лінії м. Тячів – с. Фонтиняси (поглиблення на південь верхньої кромки від 40–50 км до 90 км), центральна – до лінії м. Рахів – м. Ясеня – локальна зона на глибині від 110 км, південна – упровадження з півдня або вертикальне проникнення, бо верхня кромка занурюється з 60 до 110 км.

Висновки

Отримано нові експериментальні дані методами МТЗ за допомогою сучасного обладнання із використанням передових технологій спостережень у межах Карпатського регіону України. Здійснено опрацювання експериментальних даних та аналіз передавальних операторів МТ-поля. Отримано нові оцінки кривих позірного опору та фаз імпедансу від 10 до 10000 с.

За якісною інтерпретацією результатів магнітотелуричних досліджень визначено та деталізовано аномальний неоднорідний розподіл електропровідності, який доповнює сучасні уявлення про будову земної кори та верхньої мантії. На цьому етапі інтерпретації передбачено існування ланцюга локальних аномалій земної кори у межах Вигорлат-Гутинської вулканічної гряди, Магурського, Поркулецького, Дуклянського, Кросненського, Рахівського покривів та Мармароського масиву, який просторово збігається із розташуванням осі Карпатської аномалії електропровідності. Від Закарпатського прогину до Скибових покривів зафіксовано неоднорідне поширення шару аномальної електропровідності на глибинах верхньої мантії.

Отриманий розподіл електропровідності в земній корі та верхній мантії території Українських Карпат можна використовувати під час побудови глибинних геологічних і геотектонічних моделей, а також для пояснення геодинамічних процесів регіону.

Публікація містить результати досліджень за прикладною темою № ІІІ-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.).

Література

Acta Geodatica, Geophysica et Montanistica Hungarica. (1984). *Akadeviai Kiado, Budapest,* 19(1–2), 188.

Adam, A., (Ed.). (1976). Geoelectric and Geothermal studies (East-Central Europe, Soviet Asia). KAPG Geophysical monography. Akadeviai Kiado, Budapest. 752.

Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A., Nazarevych, L., Pek, J., Tarasov, V., & Kalenda, P. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians Stud. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(2), 280–296. https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y.

Kováčiková, S., Logvinov, I., & Tarasov, V. (2019). The relation of the seismicity in the eastern part of the Ukramian Carpathian and the conductivity distribution in the Earth's crust. *Geologica Carpathica*, 70(6), 483–493. https://doi.org/0.2478/geoca-2019-0028.

Semenov, V. Yu., Kulik, S. N., Logviniv, I. M. (1996). Estimation of the geological structure. *Dopovidi NAN Ukrayiny,* (12), 134–137.

Varentsov, Iv. M. (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.

Wiese, H. (1963). Geomagnetische Tiefentellurik. Teil III: Die geomagnetischen Variationen in Mittel- und Sudost-Eoropa als Indikator der Streichrichtund grossraumiger elektrischer Untergrundstrukturen. *Geofisica pura et applicata,* (56), 101–114.

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*, 4(3), 335–342.

Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. (2009). Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир. 668 с.

Бурахович Т. К. (2004). Квазитрехмерная геоэлектрическая модель Карпатского региона. *Геофиз. журн*., 26(4), 63–74.

Глушко В. В., Круглов С. С. (Ред.). (1986). Тектоническая карта Украинских Карпат масштаба 1:200000. Киев: Мингео Украинской УССР.

Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. (2011). Украинские Карпаты (геофизика, глубинные процессы). Київ: Логос. 128 с.

Муровська Г. В. (2019). Глибинна будова та альпійська геодинаміка Карпатського та Кримсько-Чорноморського регіонів України [Текст]: автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.22. Муровська Ганна Валеріївна; НАН

України, Ін-т геофізики ім. С. І. Субботіна. Київ, 35 с.

Рокитянский И. И., Ингеров А. И. (1999). Электромагнитные исследования Карпатской аномалии электропроводности. *Геофиз. журнал,* 21(4), 59–70.

Третяк К. Р., Максимчук В. Ю., Кутас Р. І. та ін. (2015). Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 420 с.

Anton KUSHNIR[1a], Tatiana BURAKHOVYCH[1b], Volodymyr ILYENKO[1c], Bogdan SHYRKOV[1]

[1] Institute of Geophysics by S. I. Subbotin name of the NAS of Ukraine, Kyiv, ave. Akademika Palladina, 32, Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail:antonn@ukr.net; burahovich@ukr.net; ivageophysicist@gmail.com; bog_dan90@ukr.net; [1a] https://orchid.org/0000-0003-1026-9268; [1b] https://orchid.org/0000-0002-3727-2363; [1c] https://orchid.org/0000-0002-9409-6968

MODERN MAGNETOTELLURIC RESEARCHES OF THE UKRAINIAN CARPATHIANS

In order to study the deep structure of the southwestern Ukrainian Carpathians, where the Carpathian conductivity anomaly is located, in 2015 and 2020, modern synchronous magnetotelluric studies were carried out on the profiles of Mukachevo – Skole, Seredne – Borynya and Karpatsky at twenty-three points and the spatiotemporal distribution and the electric field on the Earth's surface, which can be used to assess the conductivity and geoelectrical structure of the region, was obtained. Processing of experimental data was performed using the software PRC_MTMV, which provides a common noise-canceling impedance estimation for synchronous magnetotellurical recordings. Curves of apparent electrical resistivity (amplitude values and phases of impedance) from 10 to 10000 s were obtained reliably. A joint analysis of the apparent resistivity and impedance phases and the formal interpretation of the deep magnetotellurical sounding curves using the Niblett transformation indicate the presence of the spatially inhomogeneous conductor both in the earth's crust and in the upper part of the upper mantle. The chain of local conductive sections in the earth's crust coincides with the axial part of the Carpathian conductivity anomaly. High conductivity of the upper mantle was recorded in the Ukrainian Carpathians from the Transcarpathian Depression to the Skiba cover. It is shown that it is not a homogeneous layer, there is a general deepening of the upper edge to the northeast from 40–60 km (Transcarpathian depression) to 90–100 km (Krosno cover). Sharp deepening along the Porkulets and Dukla covers is revealed. Information about the existence of a deep conductor and its parameters should be the basis for quantitative interpretation and construction of the 3D deep geoelectrical model.

Key words: South-west of the Ukrainian Carpathians; Carpathian conductivity anomaly; deep magnetotellurical sounding; anomalies of electrical conductivity.

Надійшла 12.10.2021 р.