

УДК 550.837

DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322547>

Застосування диференційних характеристик при аналізі даних вертикального електричного зондування

В.М. Логвін¹, П.Г. Пігулевський^{1,2}, С.О. Яремій¹, 2025

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
Дніпро, Україна

²Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Розглянуто результати переобробки польових геоелектричних досліджень ДГЕ «Дніпрогеофізика» з використанням додаткових диференційних характеристик потенційних полів на території, що прилягає з півдня до м. Кривий Ріг. Пропонується при аналізі вимірювань за методом вертикального електричного зондування використовувати аналоги повного градієнта та кривизни позірною питомого електричного опору. Ці характеристики суттєво допомагають при вивченні особливостей будови геологічного середовища (підняття, западини, межі пластів, зони розломів) і визначенні величини мінералізації підземних вод.

Використання диференційних характеристик дає змогу значно підвищити ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених масивів порід мінералізованими підземними водами на території Кривбасу.

Ключові слова: Український щит, зона тріщинуватості, підземні води, електро-розвідка, обробка та інтерпретація, диференційні характеристики поля.

Citation: Logvin, V.M., Pigulevskiy, P.G., & Yaremii, S.O. (2025). Application of differential characteristics in the analysis of vertical electrical sounding data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 251—256. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322547>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Вступ. Попередній аналіз результатів раніше виконаних гідрогеологічних, інженерно-геологічних матеріалів для Криворізького басейну [Рудько, Яковлев, 2018; Довгийта ін., 2021] і геофізичних досліджень на території, прилеглої до південної частини м. Кривий Ріг, показав наявність постійних змін стану гідрогеологічного середовища. Аналіз результатів геоелектричних досліджень Дніпропетровської геофізичної експедиції «Дніпрогеофізика» свідчить про необхідність більш поглибленої якісної обробки за рахунок використання диференційних характеристик електричного поля.

Об'єкти і методи дослідження. У межах досліджуваної території виділено два основні водоносні горизонти — в четвертинних відкладах з глибиною залягання від 2,5 до 13,1 м і в неогенових — від 10,5 до 22,7 м. Однозначне картування

зон з особливо високою мінералізацією підземних вод попередніми дослідженнями не вирішувало поставлених завдань, оскільки поява та поширення їх зумовлені дуже складним комплексом природних (літологічні, тектонічні, геоморфологічні умови та кліматичні явища) і техногенних факторів.

Геофізичні дослідження було виконано ДГЕ «Дніпрогеофізика» методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ) з використанням генераторів ГЕР-1/300 і АНЧ-3 та вимірювачами ЕІН-209М і МЕРІ-24. Вимірювання виконувалися в режимі змінного низькочастотного струму (4,88 Гц) симетричною установкою Шлюмберже з мідними вимірювальними електродами (MN) і сталевими живильними електродами (AB). Крок точок вимірювань на профілях спостереження дорівнював 20 м, що в 2—2,5 рази менше

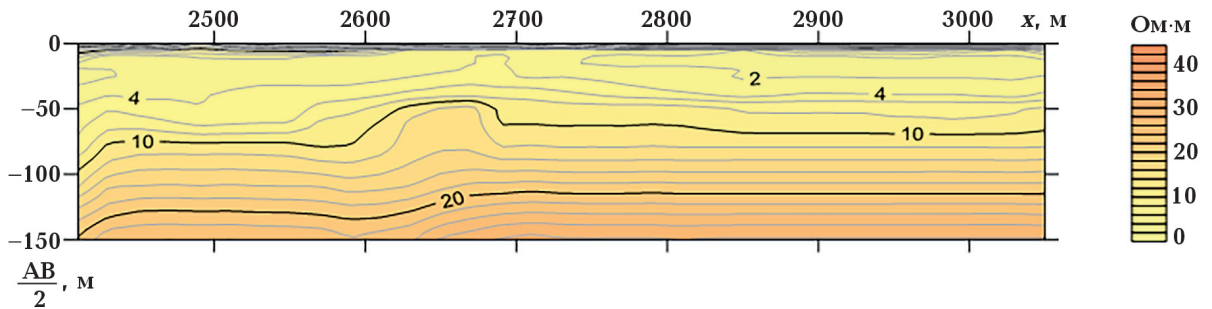


Рис. 1. Геоелектричний розріз ізоліній позірного питомого опору (ρ_a) за профілем 7.

Fig. 1. Geoelectric section of isolines of apparent resistivity (ρ_a) along profile 7.

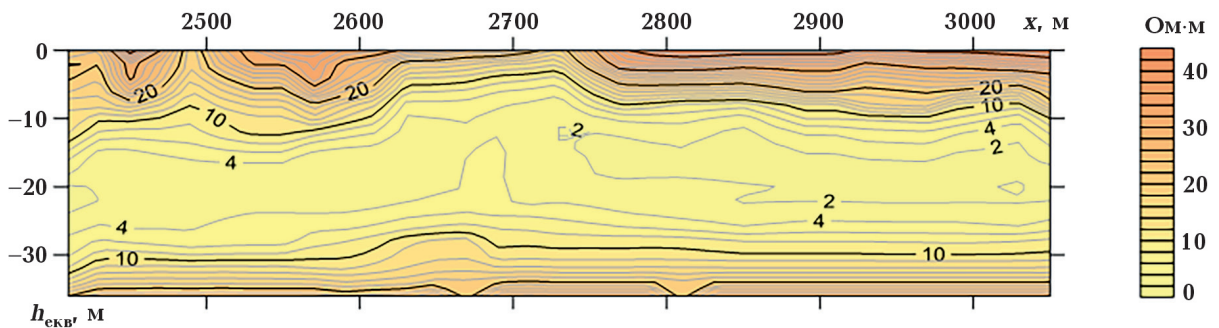


Рис. 2. Геоелектричний розріз з використанням перетвореної логарифмічної шкали осі AB/2 в еквівалентні глибини дослідження ($h_{\text{екв}}$).

Fig. 2. Geoelectric section using a transformed logarithmically scale of the AB/2 axis values to equivalent survey depths ($h_{\text{екв}}$).

загальноприйнятого стандартного. Це було зроблено для збільшення детальності вивчення верхньої частини геоелектричного розрізу та підвищення надійності досліджень в умовах присутності інтенсивних промислових електромагнітних завад.

За результатами попередніх досліджень було отримано криві ВЕЗ і побудовано класичні геоелектричні розрізи ізоліній позірного питомого опору на всіх спостережених профілях. На рис. 1, як приклад, показано геоелектричний розріз за профілем 7. На ньому видно наявність диференціації геологічного середовища за позірним електричним опором.

При побудові розрізу ізоліній ρ_{Π} по осі глибин АВ/2 особливості верхньої частини стратиграфічного горизонту стають менш розпізнаваними. Це пов'язано з дуже складною залежністю глибини дослідження від параметрів установки живильних електродів АВ, крок яких в процесі спостережень змінюється нелінійно, що не дає змоги забезпечити чітке встановлення усього стратиграфічного розрізу від перших метрів до максимальних глибин зондування.

Для підвищення ефективності якісної інтерпретації результатів ВЕЗ було запропоновано підхід, заснований на нескладній додатковій обробці при побудові геоелектричних розрізів. Він полягає, по-перше, у використанні більш виразної візуалізації елементів у верхній частині геоелектричних розрізів, по-друге, у застосуванні аналогів похідних ρ_{Π} , розрахованих на підставі формул відповідних трансформант для карт потенційних геофізичних полів.

Для збільшення виразності візуалізації розрізів геоелектричних даних замість традиційних значень АВ/2 для вертикальної осі пропонується використовувати значення еквівалентної глибини дослідження ($h_{\text{екв}}$). Еквівалентну глибину можна розрахувати на підставі логарифмічного перетворення значень напіврозносів лінії живлення установки ВЕЗ (АВ/2) за формулою: $h_{\text{екв}} = \alpha_i \ln AB/2_i$, де α_i — коефіцієнт перетворення.

Чисельне значення α_i знаходиться за евристичним оцінюванням можливої ефективної глибини дослідження для характеристикних розносів АВ/2. Таке оцінювання можна виконати за результатами кількісної інтерпретації відповідних кривих ВЕЗ або за аналізом параметричних ВЕЗ на території досліджень.

Ефективність заміни на геоелектричних розрізах АВ/2 на $h_{\text{екв}}$ наочно показано на порівнянні класичного виду геоелектричного розрізу ізоліній ρ_{Π} (див. рис. 1) і з використанням $h_{\text{екв}}$ (рис. 2).

Верхня частина розрізу не перекривається нижньою та сприяє хорошему простеженню морфології водоносних горизонтів у четвертинних і неогенових відкладах.

Для експрес-оцінювання літологічних, тектонічних особливостей території під впливом техногенних факторів були використані диференціальні характеристики полів, що мають більш локалізуючі здатності. За даними польових вимірювань було розраховано повний градієнт $\text{Grad}(\rho_{\Pi})$ (рис. 3) і кривизну $C(\rho_{\Pi})$ (рис. 4) поля ρ_{Π} . Для розрахунку зазначених диференційних характеристик поля ρ_{Π} були використані відповідні ідеї та формули з публікації [Logvin, Pigulevskiy, 2016]. Ці характеристики широко використовуються під час аналізу карт потенційних геофізичних полів. Диференційні характеристики знаходились за скінченно-різницевиими формулами:

$$\begin{aligned} \text{Grad}(\rho_{\Pi})_{i,j} &= \sqrt{(\rho_{\Pi(i+1)j} - \rho_{\Pi(i-1)j})^2 +} \\ &\quad + \sqrt{(\rho_{\Pi i(j+1)} - \rho_{\Pi i(j-1)})^2}, \\ C(\rho_{\Pi})_{ij} &= 4\rho_{\Pi ij} - (\rho_{\Pi(i+1)j} + \rho_{\Pi(i-1)j} \\ &\quad + \rho_{\Pi i(j+1)} + \rho_{\Pi i(j-1)}). \end{aligned}$$

Диференційні характеристики розраховано за скінченно-різницевиими формулами без урахування розмірів комірки сітки, тому в назві відповідних характеристик використовується термін «аналог».

Завдяки запропонованому підходу до якісної інтерпретації можна значно змен-

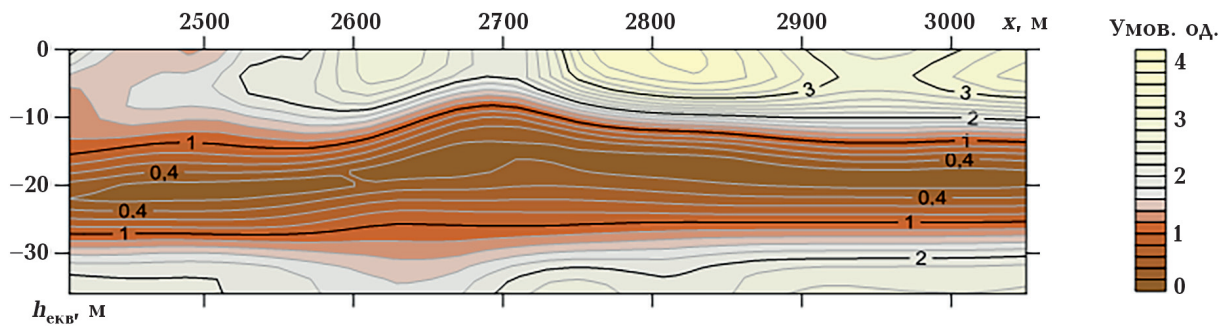


Рис. 3. Аналог повного градієнта позірного питомого опору $\text{Grad}(\rho_a)$.

Fig. 3. Analogue of the full gradient of the apparent resistivity $\text{Grad}(\rho_a)$.

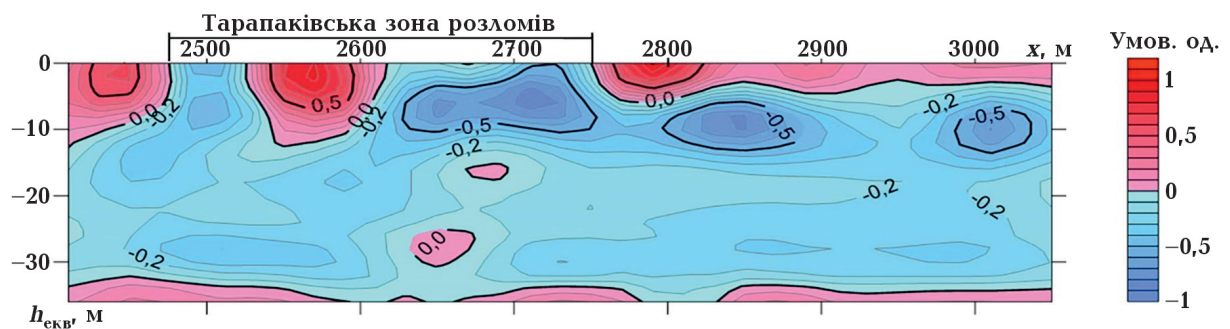


Рис. 4. Аналог кривизни позірного питомого опору $C(\rho_a)$.

Fig. 4. Analogue of the curvature of the apparent resistivity $C(\rho_a)$.

шити терміни виконання робіт (виконувати експрес-інтерпретацію) і підвищити надійність отримуваних первинних геологічних результатів.

Вибір трансформант ґрунтувався на зручності перетворення розрізу ізоліній в «геологічні об'єкти». Зони мінімальних значень аналога повного градієнта контролюють місцезнаходження та структуру окремих пластів порід (див. рис. 3). Нульові ізолінії аналога кривизни відповідають межах основних пластів, а локальні області його екстремальних значень — зонам другорядних ускладнень геологічної будови цих пластів (рис. 4).

Результати та їх обговорення. Аналіз отриманих побудов (див. рис. 3, 4) показує, що шари осадових порід мають широкий розмах висотних позначок як покрівлі, так і підшви, які можна пояснити наявністю розривних тектонічних порушень.

За результатами запропонованої обробки польових геоелектричних дослі-

джень та узагальнення геологічних, гідрогеологічних і геофізичних матеріалів можна зазначити, що просторово виділені аномалії відносяться до певних тектонічних зон. Високі значення мінералізації підземних вод переважно поширені між Західним і Тарапаківським розломами. Виділені підвищені або знижені значення мінералізації також попадають у такі зони чи локальні ділянки. Це дає змогу зробити висновок, що основними носіями підвищених показників мінералізації підземних вод є великі тектонічні порушення, які є лінійними зонами завширшки від десятків до сотень метрів. Шляхи міграції високомінералізованих вод і накопичення хімічних елементів залежить від тектонічних особливостей території, водопроникності та пористості порід, потужності покривних відкладів, тривалості експлуатації гірничотехнічних об'єктів. Тектонічні порушення і закарстовані зони є шляхами циркуляції підземних вод і

визначають гідравлічний зв'язок між водами всіх водоносних горизонтів.

Висновки. Розробка нових методичних прийомів, що покращують кількісні та якісні показники у сфері вивчення геологічного розрізу, є актуальною проблемою. Використання диференційних характеристик значно підвищує ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених масивів порід мінералізованими підземними водами на території всього Кривбасу. Результати виконаного аналізу раніше отриманих матеріалів електророзвідки

показують, що велике значення при їх переінтерпретації мають детальні характеристики розрізу, які дають змогу оперативніше картувати положення стратиграфічних меж, зон розривних порушень з інтенсивною тріщинуватістю відкритого типу та локальні прирозломні зони. Використання диференційних характеристик потенційних полів свідчить, що найбільшим обводненими є породи в межах зон крупних розривних порушень з інтенсивною площинною тріщинуватістю відкритого типу.

Список літератури

Довгий С.О., Іванченко В.В., Коржнев М.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О. та ін. *Дослідження екологічного стану територій пост-майнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення*. Київ: Ніка-Центр, 2021, 196 с.

Рудько Г.І., Яковлев Є.О. Регіональні техногенні зміни еколого-геодинамічних умов розробки залізрудних родовищ Кривбасу.

Мінеральні ресурси України. 2018. № 2. 43—50.

Logvin, V., & Pigulevskiy, P. (2016). *The analysis of the initial field transformations for their sources formalized delineation Geoinformatics 2016 — XVth International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. 2016* (Vol. 2016, pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600506>.

Application of differential characteristics in the analysis of vertical electrical sounding data

V.M. Logvin¹, P.G. Pigulevskiy^{1,2}, S.O. Yaremii¹, 2025

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

We consider the results of processing of field geoelectric surveys of the Dniprogeofizyka State Geological Survey using additional differential characteristics of potential fields in the territory adjacent to the city of Kryvyi Rih from the south. It is proposed to use analogues of the total gradient and curvature of the apparent resistivity when analysing measurements by the vertical electrical sounding method. These characteristics significantly help in studying the structure of the geological environment (uplifts, depressions, strata boundaries, fault zones) and the magnitude of groundwater mineralisation. Differential characteristics can significantly increase the efficiency of identification and localisation of waterlogged rock masses by mineralised groundwater in the territory of Kryvbas.

Key words: Ukrainian Shield, fracture zone, groundwater, electrical survey, processing and interpretation, differential field characteristics.

References

- Dovgiy, S.O., Ivanchenko, V.V., Korzhnev, M.M., Trofymchuk, O.M., Yakovlev, E.O. et al. (2021). *Research on the ecological state of post-mining areas in Ukraine on the example of the Kryvyi Rih basin and its surroundings*. Kyiv: Nika-Center, 196 p. (in Ukrainian).
- Rudko, G.I., & Yakovlev, E.O. (2018). Regional technogenic changes in ecological and geodynamic conditions of development of iron ore deposits of Kryvbas. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 43—50 (in Ukrainian).
- Logvin, V., & Pigulevskiy, P. (2016). *The analysis of the initial field transformations for their sources formalized delineation Geoinformatics 2016 — XVth International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. 2016* (Vol. 2016, pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600506>.