

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

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

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

ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АНАЛІЗІ ДАНИХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ

V. Logvin¹, <https://orcid.org/0000-0002-9972-7036>

P. Pigulevskiy^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0001-6163-4486>

S. Yaremii¹, <https://orcid.org/0000-0001-6235-0370>

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² S.I. Subbotin institute of geophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF DIFFERENTIAL CHARACTERISTICS IN THE ANALYSIS OF VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING DATA

Мета. Удосконалення аналізу геологічної будови та гідрогеологічного стану південного Кривбасу шляхом застосування диференційних характеристик і еквівалентних глибин при інтерпретації геоелектричних розрізів.

Методика. На відміну від традиційної шкали АВ/2, для побудови розрізів запропоновано логарифмічно трансформовану еквівалентну глибину $h_{екв}$, яка забезпечує більш рівномірне відображення глибинного розрізу. Додатково застосовано похідні характеристики кривих позірною опору – повний градієнт $Grad(\rho_p)$ і кривизну $C(\rho_p)$, що обчислювалися скінченно-різничними методами. Їх використання дозволяє підвищити точність локалізації меж пластів, зон тріщинуватості та геоструктурних порушень, а також виділити ділянки із зміненими фільтраційно-ємнісними властивостями порід.

Результати. Побудова розрізів у шкалі $h_{екв}$ істотно покращила візуалізацію стратиграфічних горизонтів, особливо у верхній частині розрізу, де класичні методи мають обмеження. Просторовий аналіз отриманих даних показав закономірний збіг зон високої мінералізації підземних вод із системою тектонічних порушень, зокрема в межах простягання між Західним і Тарапаківським розломами. Це підтверджує зв'язок гідрогеологічних процесів із активними неотектонічними структурами.

Наукова новизна. Вперше в регіоні застосовано еквівалентну глибину $h_{екв}$ як глибинну шкалу для побудови ВЕЗ-розрізів. Також уперше використано аналог градієнта та кривизни позірною опору як швидкі індикатори структурних меж і зон підвищеної проникності. Запропонований підхід забезпечує більш деталізоване виділення геологічних тіл у порівнянні з класичними методами інтерпретації.

Практична значимість. Методика має прикладний характер і може бути використана для інженерно-геологічних та гідрогеологічних досліджень у техногенно навантажених районах. Вона дозволяє оперативно і з меншою витратою часу виявляти зони підтоплення, тектонічні порушення, ділянки з підвищеною мінералізацією підземних вод, що є вкрай актуальним для Кривбасу. Реалізація підходу сприяє підвищенню достовірності результатів та зниженню ризиків під час прийняття господарських і природоохоронних рішень.

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

Вступ. Попередній аналіз результатів раніше виконаних гідрогеологічних, інженерно-геологічних матеріалів для Криворізького басейну [1–3] і геофізичних досліджень [4–5] на території, прилеглій до південної частини м. Кривий Ріг, показав наявність постійних змін стану гідрогеологічного середовища [3–6]. Аналіз результатів геоелектричних досліджень Дніпропетровської геофізичної експедицією (ДГЕ) «Дніпрогеофізика» засвідчив про необхідність їх більш поглибленої якісної обробки за рахунок використання диференційних характеристик спостереженого електричного поля.

Проблема мінералізації підземних вод дуже гостро стоїть на території Кривбасу. Особливу роль відіграє тектонічна будова території, яка безпосередньо відображається на протіканні всіх природних та техногенних процесів. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом в межах Кривбасу формує в кристалічному фундаменті різнорангову систему розломів [7, 8]. Дрібні тектонічні порушення і пов'язані з ними зони підвищеної проникливості впливають на формування і швидкість наземних негативних геологічних і техногенних процесів – підтоплення, формування ділянок просідання ґрунту та провалів, утворення зсувів. З тектонікою також пов'язані особливості форм рельєфу, які визначають напрям поверхневої та підземної водної фільтрації, а також зони найбільш активної фільтрації підземних вод.

Об'єкти і методи дослідження. У межах досліджуваної території виділені 2 основні водоносні горизонти. В четвертинних відкладах, з глибиною залягання від 2,5 до 13,1 м та неогенових – від 10,5 до 22,7 м. Однозначне картування зон з особливо високою мінералізацією підземних вод попередніми дослідженнями не вирішувало поставлені завдання, оскільки поява та поширення їх обумовлено дуже складним комплексом природних (літологічні, тектонічні, геоморфологічні умови та кліматичні явища) і техногенних факторів.

Геофізичні дослідження були виконані Дніпропетровської геофізичної експедицією (ДГЕ) «Дніпрогеофізика» у 2012 та 2018 рр. методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ). При геофізичних дослідженнях використовувалися генератори ГЕР-1/300 і АНЧ-3, вимірювачами служили приймачі ЕІН-209М і МЕРІ-24. Зондування виконувалося кількома вимірювальними лініями, розмір яких змінювався залежно від відстані між електродами, що живлять. Це дозволяло (при технічно можливих значеннях сили струму в ланцюзі живильних електродів) забезпечити у вимірювальній лінії достатню для вимірювань різницю потенціалів U . Вимірювання виконувались в режимі змінного низькочастотного струму (4.88 Гц) симетричною установкою Шлюмберже з мідними вимірювальними електродами (MN) і сталевими живильними електродами (AB). Застосована послідовність розносів лінії живлення і, відповідно, кількість вимірювань (точок-значень на кривій ρ_n) було обрано в 1,7 рази перевищує стандартне. Це зроблено для збільшення детальності вивчення геоелектричного розрізу, якості робіт в умовах присутності інтенсивних промислових електромагнітних перешкод. При цьому використовувалися такі напіврозноси лінії живлення $AB/2 = 1.5; 2; 3; 4.5; 6; 8; 11; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 110; 150\text{м}$.

Отримані дані свідчать про диференціацію порід із питомого електричного опору геологічного розрізу по площі досліджень. За результатами попередніх досліджень були отримані криві ВЕЗ та побудовані класичні геоелектричні розрізи на всіх спостережених профілях. На рисунку 1, як приклад, показано геоелектричний розріз за профілем 7. На ньому видно наявність диференціації геологічного середовища за позірним електричним опором.

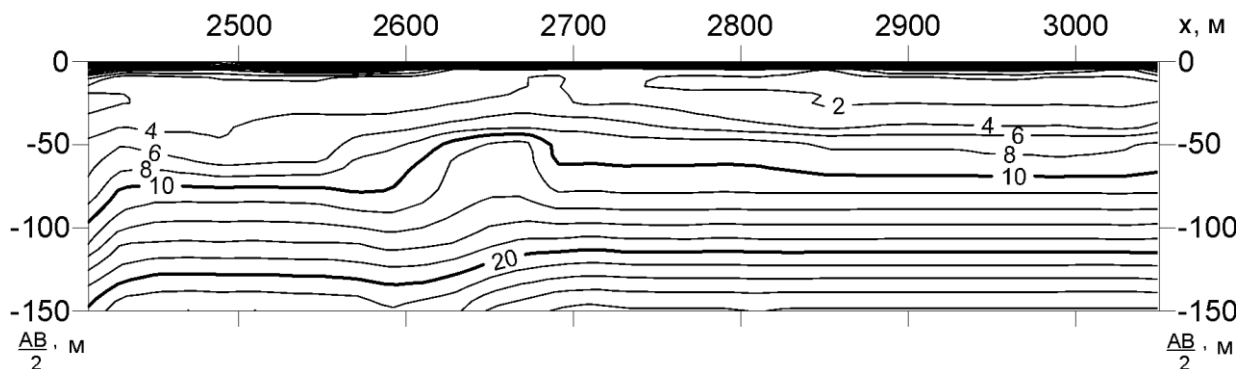


Рис. 1. Геоелектричний розріз ізоліній позірного питомого опору (ρ_n) за профілем 7

Результати польових вимірювань методом ВЕЗ, їх візуалізація, представлені у формі якісних розрізів питомих опорів, середнього значення ρ_n , кривизни поля ρ_n і осевих ліній аномалій цих полів по комплексним геофізичним профілям або по окремих їх інтервалах (рис. 2, 3). При цьому параметри «середнє значення ρ_n », «кривизна ρ_n » та «повний градієнт ρ_y » – статистичні характеристики, розраховані відповідно за формулами:

$$\text{Grad}(\rho_n)_{i,j} = \sqrt{(\rho_{n(i+1)j} - \rho_{n(i-1)j})^2 + (\rho_{ni(j+1)} - \rho_{ni(j-1)})^2},$$

$$C(\rho_n)_{ij} = 4\rho_{nij} - (\rho_{n(i+1)j} + \rho_{n(i-1)j} + \rho_{ni(j+1)} + \rho_{ni(j-1)}).$$

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

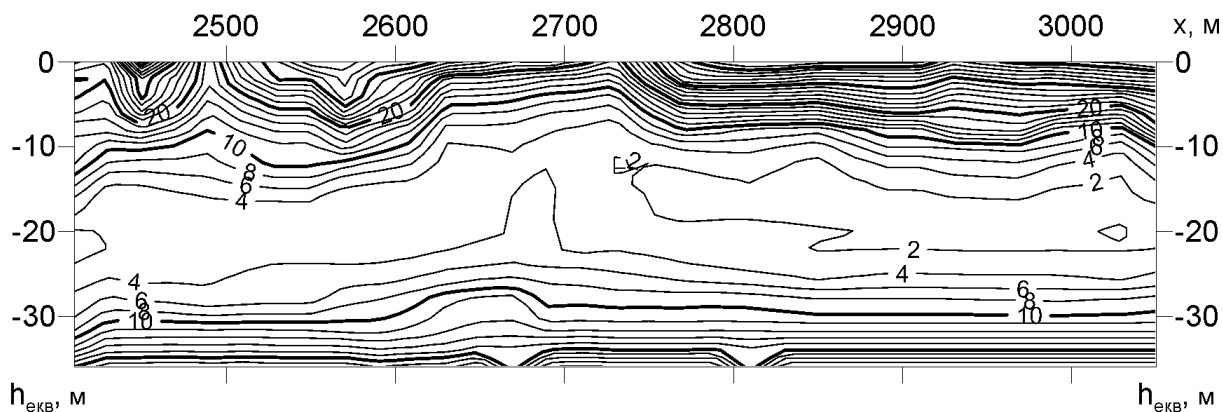


Рис. 2. Геоелектричний розріз з використанням логарифмічно перетвореної шкали осі $\frac{AB}{2}$ в еквівалентні глибини дослідження $h_{екв}$.

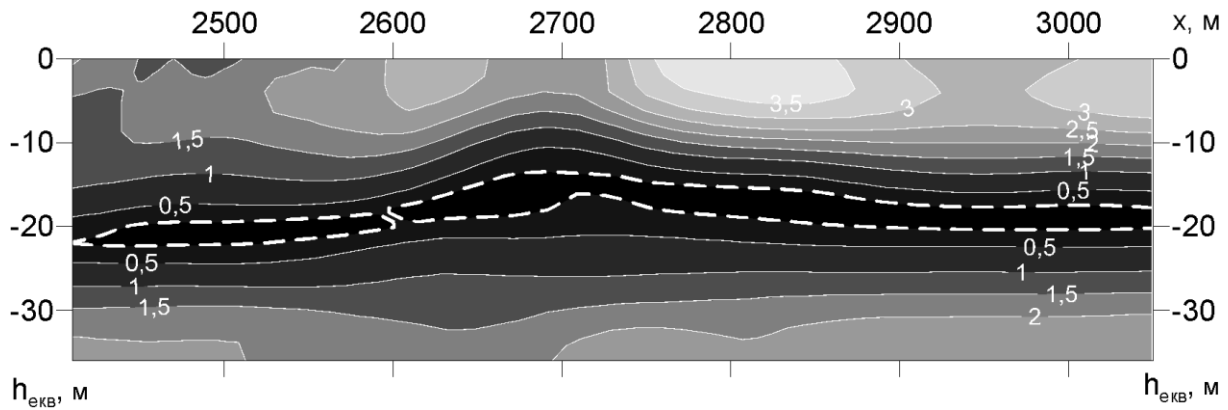


Рис. 3. Аналог повного градієнта уявного питомого опору $\text{Grad}(\rho_p)$.

При побудові розрізу ізоліній ρ_p по осі глибин $\frac{AB}{2}$ особливості верхньої частини стратиграфічного горизонту стають недостатньо розпізнаваними. Це пов'язано з дуже складною залежністю глибини дослідження від параметрів установки живильних електродів АВ, крок яких в процесі спостережень змінюється не лінійно, що не дозволяє забезпечити чітке читання усього стратиграфічного розрізу від перших метрів до максимальних глибин зондування.

Для підвищення ефективності якісної інтерпретації результатів ВЕЗ був запропонований підхід, заснований на нескладній додатковій обробці при побудові геоелектричних розрізів [9, 10]. Він полягає: по-перше, у використанні більш виразної візуалізації елементів у верхній частині геоелектричних розрізів; по-друге, у застосуванні аналогів похідних ρ_p розрахованих на основі формул відповідних трансформант для карт потенційних геофізичних полів.

Для збільшення виразності візуалізації розрізів геоелектричних даних замість традиційних значень $\frac{AB}{2}$ для вертикальної осі пропонується використовувати значення еквівалентної глибини дослідження ($h_{\text{екв}}$). Еквівалентна глибина знаходиться на основі логарифмічного перетворення значень напіврозносів лінії живлення установки ВЕЗ $\frac{AB}{2}$ за евристичною формулою:

$$h_{\text{екв}}\left(\ln \frac{AB}{2}\right) = h_i^{\text{geo}} + \alpha_i \ln \frac{AB}{2} - \ln \frac{AB_{\text{хар}}}{2_i},$$

де $\alpha_i = \frac{h_{i+1}^{\text{geo}} - h_i^{\text{geo}}}{\ln \frac{AB_{\text{хар}}}{2_{i+1}} - \ln \frac{AB_{\text{хар}}}{2_i}}$ – коефіцієнт перетворення, h_i^{geo} – глибина залягання і-й границі опорного геоелектричного розрізу, $\ln \frac{AB_{\text{хар}}}{2_i}$ – логарифм значення характеристичного розносу, який «контролює» розташування і-й границі опорного геоелектричного розрізу, $\frac{AB}{2}$ – робочий рознос, для якого розраховується значення еквівалентної глибини дослідження. Значення індексу i для розрахунків обирається за умови $\frac{AB_{\text{хар}}}{2_i} \leq \frac{AB}{2} \leq \frac{AB_{\text{хар}}}{2_{i+1}}$.

Оцінку значень h_i^{geo} можна виконати за результатами кількісної інтерпретації опорних або середніх кривих ВЕЗ або за аналізом параметричних ВЕЗ на території досліджень.

Ефективність заміни на геоелектричних розрізах $\frac{AB}{2}$ на $h_{\text{екв}}$ наглядно показано на порівнянні класичного виду геоелектричного розрізу ізоліній позірного питомого опору ($\rho_{\text{п}}$) (див. рис. 1) та з використанням еквівалентної глибини дослідження ($h_{\text{екв}}$) (див. рис. 2), де верхня частина розрізу не «затушовується» (перекривається) нижньою та сприяє доброму простеженню морфології водонесних горизонтів в четвертинних та неогенових відкладах.

Для експрес оцінки літологічних, тектонічних особливостей території під впливом техногенних факторів були використані диференціальні характеристики полів, які мають більш локалізуючу здатність. На основі польових вимірювань були розраховані повний градієнт $\text{Grad}(\rho_{\text{п}})$ (див. рис. 3) та кривизна $C(\rho_{\text{п}})$ (рис. 4) поля $\rho_{\text{п}}$. Для розрахунку вказаних диференційних характеристик поля $\rho_{\text{п}}$ були використані відповідні ідеї та формули з робіт [4].

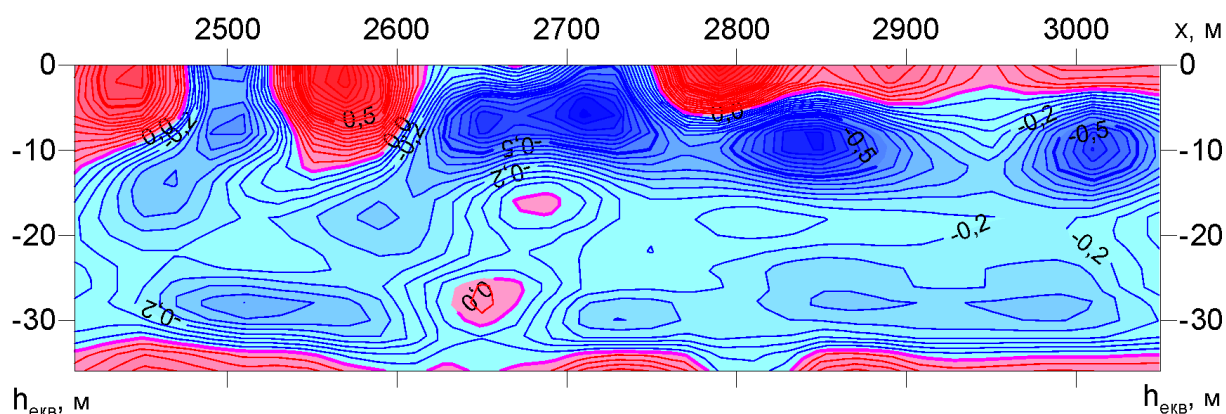


Рис. 4. Аналог кривизни уявного питомого опору $C(\rho_{\text{п}})$.

Ці характеристики широко використовуються під час аналізу карт потенційних геофізичних полів. Диференційні характеристики розраховувались за скінченно-різничними формулами без врахування розмірів комірки сітки, тому в назві відповідних характеристик використовується термін «аналог».

Завдяки запропонованому підходу до якісної інтерпретації можливо значно зменшити терміни виконання робіт (виконувати експрес-інтерпретацію) і підвищити надійність первинно отримуваних 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 (див. рис. 4).

Середнє значення ефективно при виділенні регіонального тренду, кривизна підкреслює межі поля, повний градієнт, зокрема літолого-тектонічні дислокації. Так екстремальні значення кривизни, що контролюють області порушення статистичної нестационарності геополя, які у свою чергу приурочені до геологічних кордонів або тектонічних зон. На розрізах здається питомих опорів, їх се-

редніх значень, граничних параметрів (кривизни зокрема), осьових ліній аномалій можна якісно виділити підняття, западини, а також локалізувати низькоомні аномалії, пов'язані з розломами, зонами тріщинуватості, у тому числі обводнені. Закономірностей у розташуванні зон особливо високої мінералізації підземних вод на досліджуваній території попередніми дослідженнями встановити не вдалося, оскільки поява та поширення їх обумовлено дуже складним комплексом природних (геологічні, тектонічні та геоморфологічні умови, кліматичні явища, суффузійні та карстові процеси) та техногенних факторів.

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 підосви, які можливо пояснити наявністю розривних тектонічних порушень та зміною їх геоелектричних властивостей [7, 8, 11].

За результатами запропонованої обробки польових геоелектричних досліджень та узагальнення геологічних, гідрогеологічних та геофізичних матеріалів, можна відзначити, що у просторовому відношенні виділені аномалії відносяться до певних тектонічних зон. Високі значення мінералізації підземних вод переважно поширені між розломами Західним і Тарапаківським [7, 8]. Виділені підвищені або знижені значення мінералізації також попадають у такі зони чи локальні ділянки (див. рис. 3, 4). Останні, як правило, визначаються положенням (простиранням) Криворізької системи субмеридіональних розломів (17°) та зрізної («сікучою») її – діагональної північно-західної (305°). Високі значення мінералізації підземних вод переважно поширені між розломами Західним і Тарапаківським, і навіть – Катеринівським і Скелеватським. Це дозволяє зробити висновок, що основними носіями підвищених показників мінералізації підземних вод є великі тектонічні порушення, які є лінійними зонами шириною від десятків до сотень метрів. Їх морфологію можна відстежити на детальній ділянці геофізичних досліджень під хвостосховищем «Друга карта». Шляхи міграцій підземних вод від відвалів «Лівобережний» до річки Інгулець обмежені тектонічним Західним розломом та системою західно-західного простягання та балкою Вовчої, що на північ від с. Новоселівка впадає у річку Інгулець. Шляхи міграції високо мінералізованих вод і накопичення хімічних елементів залежить від тектонічних особливостей території, водопроникності та пористості порід, потужності покривних відкладень, 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.

Проведеними електророзвідувальними роботами у модифікації ВЕЗ між Лівобережними відвалами, закрутом р. Інгулець та с. Новоселівка ділянок суцільного підтоплення не виявлено (див. рис. 3). Уздовж профілів у верхній частині геологічного розрізу від 2–5 до 10 м у більшості випадків відзначаються підвищені значення питомого опору, що вказує на відсутність обводнення в межах території, що вивчається (рис. 5).

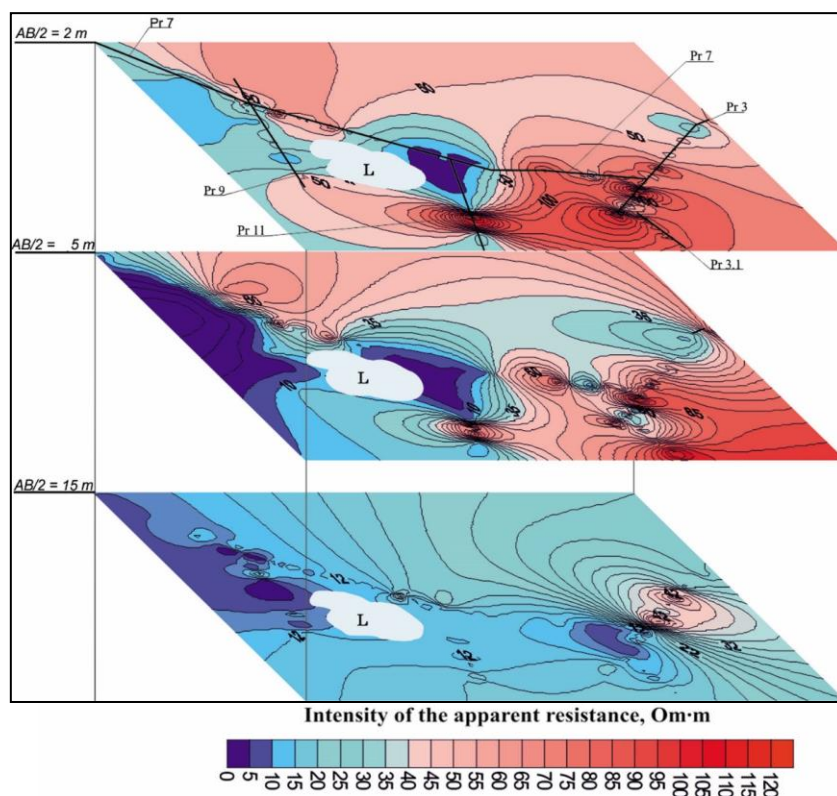


Рис. 5. Погоризонтні зрізи на ділянці ставка Леб'яжого (в аксонометрії) опору ρ_{Π} на розносах $AB/2$ 1,5–15 м

Виконані нами геоелектричні дослідження дозволили побудувати прогнозну карту глибин залягання докембрійських порід з наявністю локальної депресії по покрівлі фундаменту в основі ставка Леб'яжого [12]. Зона, що описується, обумовлена специфікою з'єднання (вузлом) різноорієнтованих розривних порушень, де у вигляді лінз, досі зберігаються (накопичуються) високомінералізовані води, законсервовані в Криворізькій системі розломів і води, що мігрували в 1978 р. по діагональним розломам північно-західного накопичувача шахтних вод у балці Свистунова. Ці лінзи високомінералізованих вод можуть розбавлятися незначними за кількістю менш мінералізованими джерелами з розломних зон в основі ложа хвостосховища «Войкове». На погоризонтних зрізах ВЕЗ (див. рис. 5) помітна міграція мінералізованих вод (темно-синій колір) на різних стратиграфічних рівнях.

Висновки. Покращення кількісних та якісних розрахунків при вивченні геологічного розрізу потребує нових методичних прийомів, що, є актуальною повсякденної проблемою. Використання диференційних характеристик дозволило значно підвищити ефективність робіт з виділення та локалізації обводнених масивів порід мінералізованими підземними водами на території всього Кривбасу.

Запропонований підхід дозволяє виконувати переінтерпретацію раніше отриманих матеріалів електророзвідки та побудувати більш детальні розрізи, які дозволяють оперативне картувати положення стратиграфічних меж, зон розривних порушень з інтенсивною тріщинуватістю відкритого типу та локальні

прирозломні зони. Використання диференційних характеристик потенційних полів показало, що найбільшим обводненням є породи в межах зон крупних розривних порушень з інтенсивною площинною тріщинуватістю відкритого типу.

Виконані комплексні дослідження дозволили побудувати прогнозну карту глибин залягання докембрійських порід та встановити наявність локальної депресії по покрівлі фундаменту в основі ставка «Лебязий». Вона обумовлена специфікою з'єднання різноорієнтованих розривних порушень, де у вигляді лінз зберігаються високомінералізовані води, законсервовані в Криворізькій системі розломів.

Перелік посилань

1. Довгий, С.О., Іванченко, В.В., Коржнев, М.М., Трофимчук, О.М., & Яковлев, Є.О. (2021). Дослідження екологічного стану територій постмаїнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення. Ніка-Центр. <https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/12/dosl-postmaining1maket.pdf>
2. Рудько, Г.І., & Яковлев, Є.О. (2018). Регіональні техногенні зміни еколого-геодинамічних умов розробки залізрудних родовищ Кривбасу. *Мінеральні ресурси України*, 2, 43–50. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2018_2_8
3. Багрій, І. Д., Білоус, Ю. Г., Вілкул, Ю. Г., та ін. (2005). Досвід комплексної оцінки та картографування факторів техногенного впливу на природне середовище Кривого Рогу та Дніпродзержинська. Фенікс.
4. Пігулевський, П. Г., Свистун, В. К., & Кирилюк, О. С. (2016). Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 2. Результати застосування геоелектричних методів при обстеженні ділянок підтоплення. *Geoinformatika*, 4(60), 62–74.
5. Пігулевський, П. Г., Свистун, В. К., & Кирилюк, О. С. (2017). Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 4. Використання потенціальних полів при вивченні сучасної тектоніки. *Геоінформатика*, 3(63), 48–55.
6. Пігулевський, П. Г., & Свистун, В. К. (2018). *Геофізичні дослідження процесів підтоплення в промисловому Кривбасі*. ФОП Мезіна В. В.
7. Pihulevskiy, P.H., Kendzera, O.V., Babiy, K.V., Anisimova, L.B., & Kyryliuk, O.S. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005>
8. Pihulevskiy, P. G., Anisimova, L. B., Kalinichenko, O. O., Panteleeva, N. B., & Hanchuk, O. V. (2021). Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>
9. Logvin, V., & Pigulevskiy, P. (2016). The analysis of the initial field transformations for their sources formalized delineation. *15th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600506>
10. Логвін, В.М., Пігулевський, П.Г., & Яремій, С.О. (2025). Використання диференційних характеристик потенційних полів при обробці геоелектричних спостережень. *Геофізичний Журнал*, 47(2), 251–256.
11. Пігулевський, П. Г., Свистун, В. К., & Кирилюк, О. С. (2016). Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 1. Фізико-геологічні передумови досліджень. *Geoinformatika*, 3(59), 69–75.
12. Пігулевський, П. Г., Свистун, В. К., Єременко, Г. І., & Яремій, С. О. (2023). Застосування дистанційних методів при дослідженні впливу техногенних споруд на поверхневі та підземні води (на прикладі південного Кривбасу). *Гірничий вісник*, 111, 139–144. <http://iomining.in.ua/ua/homeua/journal/111ua/>

ABSTRACT

Purpose. Improvement of the analysis of the geological structure and hydrogeological condition of the southern Kryvbas region through the application of differential characteristics and equivalent depths in the interpretation of geoelectric sections.

Methodology. Unlike the traditional AB/2 scale, a logarithmically transformed equivalent depth h_{eq} is proposed for constructing sections, which provides a more uniform representation of the depth section. Additionally, the derivative characteristics of apparent resistance curves – the total gradient $\text{Grad}(\rho\Pi)$ and curvature $C(\rho\Pi)$ – calculated using finite difference methods were applied. Their use allows for increased accuracy in localising layer boundaries, fracture zones and geostructural disturbances, as well as identifying areas with altered filtration and storage properties of rocks.

Results. The construction of sections on the h_{eq} scale significantly improved the visualisation of stratigraphic horizons, especially in the upper part of the section, where classical methods have limitations. Spatial analysis of the data obtained showed a regular coincidence of zones of high groundwater mineralisation with the system of tectonic disturbances, in particular within the extension between the Western and Tarapakov faults. This confirms the connection between hydrogeological processes and active neotectonic structures.

Scientific novelty. For the first time in the region, the equivalent depth h_{eq} has been used as a depth scale for constructing VES sections. Also, for the first time, an analogue of the gradient and curvature of apparent resistance has been used as a quick indicator of structural boundaries and zones of increased permeability. The proposed approach provides a more detailed identification of geological bodies compared to classical interpretation methods.

Practical significance. The methodology is applied in nature and can be used for engineering-geological and hydrogeological studies in technologically loaded areas. It allows for the rapid and time-efficient detection of flooding zones, tectonic disturbances, and areas with increased groundwater mineralisation, which is extremely relevant for the Kryvbas region. The implementation of this approach contributes to increasing the reliability of results and reducing risks when making economic and environmental decisions.

Keywords: *Ukrainian Shield, fracture zone, groundwater, electrical prospecting, processing and interpretation, differential field characteristics.*

дата першого надходження статті до видання	02.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	03.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	05.09.2025