

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ВПЛИВУ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ НА ДАНІ ВЕЗ

Показано застосування методу граничних елементів для математичного моделювання задачі визначення величини впливу рельєфу місцевості на дані вертикальних електричних зондувань. Проведено розрахунки для моделей гірського хребта, яру, а також для реальної гірської ділянки.

**Ключові слова:** математичне моделювання; вертикальні електричні зондування; рельєф поверхні.

### Вступ

Серед класичних методів електророзвідки і сьогодні велика увага приділяється методам постійного електричного струму, у тому числі і вертикальним електричним зондуванням (ВЕЗ), завдяки добре опрацьованому математичному апарату вирішення прямих і обернених задач [Матвеев, 1974; Хмелевской В., Шевнин В., 1988, 1992]. Проте цей апарат базується на моделі горизонтально-шаруватого півпростору, а реальне середовище може суттєво відрізнятись від нього, що призводить як до ускладнення процесу інтерпретації, так і до неточностей у визначенні справжніх параметрів геологічного середовища (глибин залягання границь пластів, питомого опору гірських порід тощо). Із розвитком чисельних методів з'явилась можливість отримання розв'язків і для горизонтально-неоднорідних середовищ. Зокрема, за допомогою методу граничних інтегральних рівнянь (МГІР) реалізовано алгоритми для розв'язку прямих задач електророзвідки постійним струмом у півпросторі з неоднорідними включеннями, що мають прямолінійні границі, та досліджено особливості розподілу електричних полів для таких випадків [Хмелевской В., Шевнин В., 1988]. Проте питання впливу рельєфу поверхні, що може бути важливим у гірських районах, залишається недостатньо висвітленим.

### Застосування методу граничних елементів для розрахунку впливу рельєфу поверхні на дані методів постійного струму

Для візуалізації та інтерпретації результатів реальних польових спостереженнях методами постійного електричного струму звичайно використовують трансформацію даних у позірний опір:

$$\rho_{\text{п}} = K \cdot dU / I, \quad (1)$$

де  $K$  – геометричний коефіцієнт установки,  $dU$  – різниця потенціалів на приймальних електродах,  $I$  – сила струму у живильному контурі.

Відомо, що в однорідному півпросторі  $\rho_{\text{п}}$  дорівнює справжньому питомому опору  $\rho_{\text{с}}$  середовища. Якщо ж поверхня однорідного середовища відрізняється від площини, тобто має рельєф, то позірний опір (позначимо його  $\rho_{\text{р}}$ ) не збігатиметься зі справжнім. Тоді співвідношення:

$$\delta = \rho_{\text{р}} / \rho_{\text{с}} \quad (2)$$

і визначатиме вплив рельєфу поверхні на електророзвідувальні дані [Сапужак та ін., 2006].

Для розрахунку цієї величини використаємо модель електрооднорідного середовища із заданим рельєфом непровідної поверхні та метод гра-

ничних елементів [Сапужак, 2002], який є вдосконаленням і розвитком МГІР та дозволяє описувати складні криволінійні границі розділу. Відповідно до [Сапужак та ін., 2006; Сапужак, Сироєжко, 2011] ми можемо обчислити електричний потенціал у будь-якій точці  $x$  середовища, у тому числі і на поверхні:

$$U(x) = U_0(x) + \sum_{n=1}^N g_n \int_{\gamma_n} E(x, \xi) d\gamma_n, \quad (3)$$

де  $U_0(x)$  – потенціал створений контрольованими джерелами струму,  $\gamma_n$ ,  $n = 1, \dots, N$  – граничні елементи (ГЕ), на які поділена поверхня в області моделювання,  $g_n$  – додаткові джерела струму, розраховані для кожного ГЕ,  $\xi$  – система координат, що співпадає з  $x$  та використовується для визначення відстаней,  $E(x, \xi)$  – фундаментальний розв'язок рівняння Лапласа для півпростору.

Розраховані таким чином значення електричного потенціалу використовуються у виразі (1) для знаходження позірного опору, а значить і величини  $\delta$  впливу рельєфу поверхні для конкретної геометричної конфігурації вимірювальної установки.

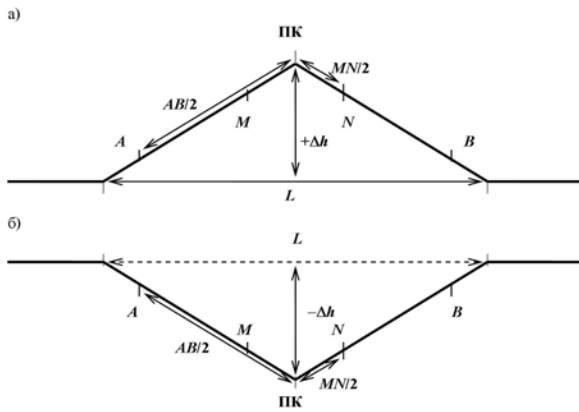
Отже, маючи реальні дані про рельєф місцевості, ми можемо розрахувати величину його впливу за (1)–(3) для будь-якої модифікації методів постійного струму – ВЕЗ, профілювання, дипольного зондування, багатоелектродної томографії тощо.

### Вплив рельєфу поверхні характерних моделей на дані ВЕЗ

Розглянемо особливості впливу рельєфу на дані ВЕЗ на прикладах моделей гірського хребта та яру (рис. 1). Вважається, що моделі безмежно довгі, величина основи їх перерізу  $L$ , висота хребта або глибина яру  $\Delta h$ , центр зондування розташований посередині моделей (точка ПК), живильні електроди  $AB$ , приймальні –  $MN$ .

Розрахунки проведено для двох співвідношень  $MN$  до  $AB$ :  $MN = AB/3$  і  $MN = AB/10$  та трьох геометричних конфігурацій моделей:  $\Delta h/L = 0.05$  (кут схилу  $\alpha \approx 6^\circ$ ),  $\Delta h/L = 0.1$  ( $\alpha \approx 11^\circ$ ),  $\Delta h/L = 0.15$  ( $\alpha \approx 17^\circ$ ). Для графічного зображення впливу рельєфу використовується величина  $\Delta = \delta \cdot 100\%$ .

Чисельні результати виконаних розрахунків представлено на рис. 2. Зображені криві для моделі гірського хребта позначені буквою а, яру – б; для  $MN = AB/3$  – цифрою 1, для  $MN = AB/10$  – цифрою 2. Як свідчать наведені графіки, вплив рельєфу досить значний – від 10–15% для  $\Delta h/L = 0.05$  (кут схилу  $\alpha \approx 6^\circ$ ) до 30–50% для  $\Delta h/L = 0.15$



**Рис. 1.** Схематичне зображення поперечного перерізу моделі гірського хребта (а) та яру (б)

( $\alpha \approx 17^\circ$ ). Максимальна величина  $\Delta$  спостерігається при  $AB/L \approx 0.75$ , тобто при розмірі живильної лінії близько трьох чвертей від поперечного розміру моделі. Із збільшенням  $AB$  величина  $\Delta$  зменшується і при розмірі  $MN \approx L$  зводиться практично до нуля.

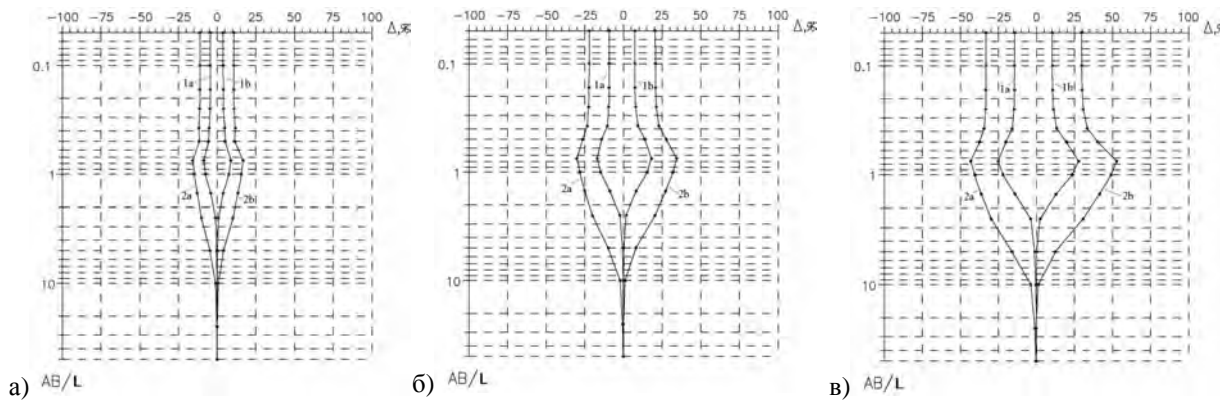
Рельєф поверхні типу „яр” має дещо більший вплив на дані ВЕЗ за „хребет”.

**Приклад розрахунку впливу рельєфу у гірських районах**

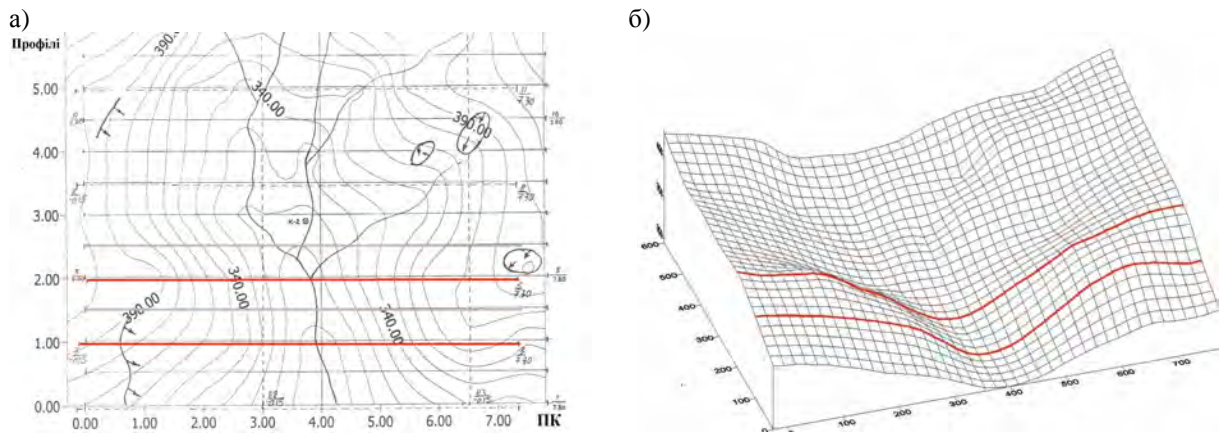
Для розрахунку впливу рельєфу місцевості у реальних гірських районах вибрано одну зі зсуво-небезпечних ділянок Закарпаття (Копашневе–1), на яких проводили детальні роботи методом ВЕЗ. На рис. 3 зображено рельєф місцевості ділянки у вигляді ізоліній висот (рис. 3,а) та об’ємної поверхні (рис. 3,б), а також профілі виконаних на цій ділянці ВЕЗ.

Червоними лініями позначено профілі, для яких виконано розрахунок величини впливу рельєфу. Результати розрахунків для профілів 1.0 та 2.0 представлено на рис. 4. Червоними лініями позначено криві впливу рельєфу найбільшої величини (до 15–20%), а відповідні їм відрізки профілів позначено на об’ємному зображенні поверхні ділянки (рис. 5).

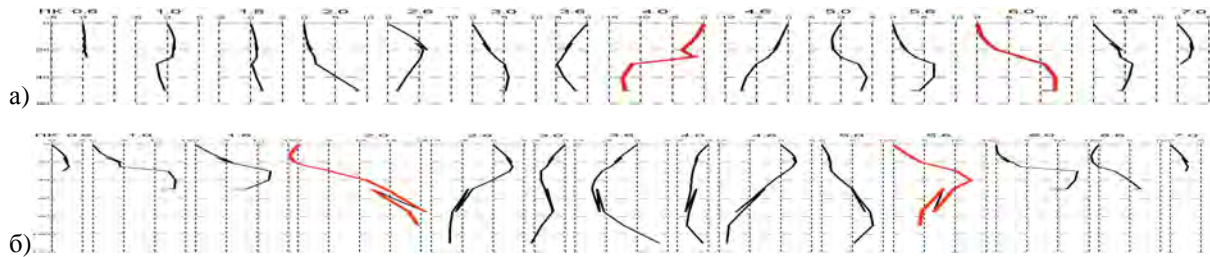
Наведені результати свідчать, що найбільший вплив рельєфу спостерігається у місцях максимальних „перегинів” місцевості – типу „хребет” або „яр”.



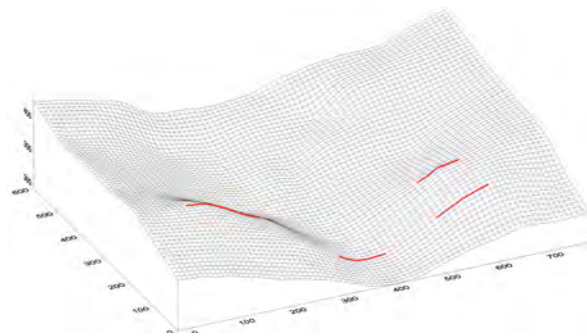
**Рис. 2.** Криві впливу рельєфу поверхні на дані ВЕЗ на моделях гірського хребта (1а, 2а) та яру (1б, 2б) для  $MN = AB/3$  (1а, 1б) і  $MN = AB/10$  (2а, 2б) для: а)  $\Delta h/L = 0.05$  (кут схилу  $\alpha \approx 6^\circ$ ); б)  $\Delta h/L = 0.1$  ( $\alpha \approx 11^\circ$ ); в)  $\Delta h/L = 0.15$  ( $\alpha \approx 17^\circ$ )



**Рис. 3.** Ділянка Копашневе–1 у вигляді карти ізоліній висот (а) та об’ємної поверхні (б) з нанесеними профілями ВЕЗ (червоні лінії), для яких розраховувався вплив рельєфу поверхні



**Рис. 4.** Криві впливу рельєфу (у відсотках) на дані ВЕЗ на пікетах профілів 1.0 (а) та 2.0 (б) ділянки Копашневе-1. Червоними лініями виділено максимальні зміни (до 15–20 %)



**Рис. 5.** Відрізки профілів (червоні лінії) ВЕЗ, для яких спостерігається найбільший вплив рельєфу (до 15–20%)

**Висновки**

Для математичного моделювання впливу рельєфу місцевості на дані вертикальних електричних зондувань використано метод граничних елементів, який дозволяє описувати складні тривимірні поверхні.

Розрахунок впливу рельєфу характерних моделей (гірського хребта та яру) вказав на суттєве спотворення кривих позірнього опору ВЕЗ (до 50% при крутизні схилів до 17°).

Вплив яру при інших однакових характерних розмірах моделей більший за вплив гірського хребта. Для однакових розмірів живильних ліній АВ вплив рельєфу поверхні менший з використанням більших приймальних ланок MN.

У випадку, якщо розмір MN перевищує геометричні розміри неоднорідностей рельєфу поверхні

спотворення кривих ВЕЗ зводиться практично до нуля.

Для реальних спостережень методом ВЕЗ у гірських районах (ділянка Копашневе-1 у Закарпатті) розрахунки впливу рельєфу підтвердили його значний вклад – до 20% на окремих відрізках профілів.

Отримані результати свідчать про необхідність врахування впливу рельєфу місцевості для уникнення похибок інтерпретації даних ВЕЗ у гірських районах та сильно пересіченій місцевості.

**Література**

Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. – М., Недра, 1974. – 232 с.  
 Сапужак О. Геоелектричне поле у неоднорідному середовищі із складним рельєфом денної поверхні // Праці НТШ. – Львів, 2002. – Т.VIII. – С. 25–29.  
 Сапужак Я., Сапужак О., Сироечко О. Методика розрахунку впливу рельєфу на дані вертикальних електричних зондувань // Праці НТШ. – Львів, 2006. – Т.XVII: Геофізика. – С. 11–21.  
 Сапужак О.Я., Сироечко О.В. Математичне моделювання та інтерпретація результатів ВЕЗ в умовах складного рельєфу місцевості / Геодинаміка. – № 2(11). – 2011. – С. 281–283.  
 Хмелевской В., Шевнин В. Электрическое зондирование геологической среды. – МГУ, Ч.1, 1988. – 176 с.  
 Хмелевской В., Шевнин В. Электрическое зондирование геологической среды. – МГУ, Ч.2, 1992. – 200 с.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ДАННЫЕ ВЭЗ**

**О.Я. Сапужак, О.В. Сыроечко**

Показано использование метода граничных элементов для математического моделирования задачи определения величины влияния рельефа местности на данные вертикальных электрических зондирований. Выполнены расчеты для моделей горного хребта, оврага, а также для реального горного участка.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; вертикальные электрические зондирования; рельеф поверхности.

**CALCULATING THE INFLUENCE OF A TERRAIN RELIEF ON DATA OF VERTICAL ELECTRIC SOUNDING**

**O. Sapuzhak, O. Syrojczko**

The boundary element technique applied to the mathematical modelling problem of a value determination of a terrain relief influence on the vertical electric sounding data. The calculations for models of a mountain range, a ravine, and also for a real mountain area are done.

**Key words:** mathematical modeling; vertical electrical sounding; surface relief.