

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ НА ПРИЛЕГЛИХ ДО ДОМБРОВСЬКОГО КАЛІЙНОГО КАР'ЄРУ ТЕРИТОРІЯХ

О.І.Романюк, В.І.Шамотко, С.А.Дециця, Р.Б.Дутко, Р.І.Кусайло

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України,  
79060, Львів, вул. Наукова 3-б, тел (0322) 648563, e-mail: carp@cb-igph.lviv.ua

За допомогою технологічного комплексу, що об'єднує високочастотні індукційні зондування території, параметричні зондування гідрогеологічних свердловин з фізичним моделюванням латерально-неоднорідних середовищ, встановлено кореляційні зв'язки індуктованих сигналів та їх трансформацій в геоелектричні параметри (електричний опір, потужність) середовища з даними гідрохімічних аналізів проб води; виявлено і оконтурено ореоли засолення гравійно-галькового водоносного горизонту розсолостоків з відвалів розкривних соленосних порід Домбровського кар'єру. На основі залежності нормованих током сигналів ( $\partial B_z / \partial t / I$ ) від концентрації солей оцінюється ступінь засолення водоносного горизонту: в межах площі дослідження виділено ділянки роз поширення прісних, слабо- та високомінералізованих вод, а періодичними профільними спостереженнями – динаміка процесу засолення.

При помощи технологического комплекса, объединяющего высокочастотные индукционные зондирования территорий, параметрические зондирования гидрогеологических скважин с физическим моделированием латерально-неоднородных сред, установлены корреляционные связи индуцированных сигналов и их трансформаций в геоэлектрические параметры (электрическое сопротивление, мощность) среды с данными гидрохимических анализов проб воды; выявлены и оконтурены ореолы засоления гравийно-галечного водоносного горизонта рассолостоками с отвалов раскрываемых соленосных пород Домбровского карьера. На основе зависимости нормированных током сигналов ( $\partial B_z / \partial t / I$ ) от концентрации солей оценивается степень засоления водоносного горизонта: в пределах площади исследования выделены участки распространения пресных, слабо- и высокоминерализованных вод, а периодическими профильными наблюдениями – динамика процесса засоления.

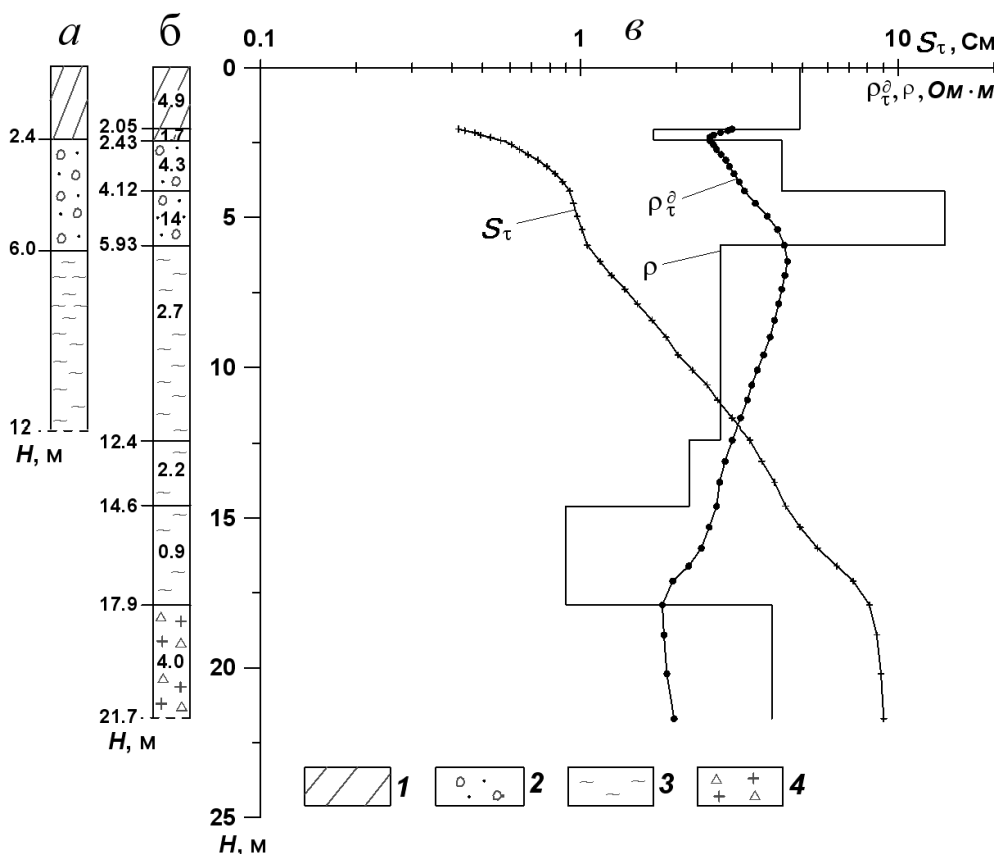
Combining high-frequency inductive soundings, parametric soundings of hydrogeological boreholes and physical modeling of lateral-heterogeneous media into single technological chain the correlation of induced signals and its transformations into geoelectric parameters (apparent resistivity, depth) of medium explored with hydrochemical tests of water samples were found out. The haloes of pollution of gravel-pebbles water-bearing horizon by saline liquid wastes of Dombrovsky pit were distinguished. The degree of salinification of water-bearing horizon is evaluated on the basis of normalized ( $\partial B_z / \partial t / I$ ) signal to saline concentration dependence. The areas with the different degree of pollution of underground waters by liquid saline wastes (low, medium and high) were distinguished on the territory explored. Periodical observations along the profiles specified manifest the dynamics of salinification.

Негативний вплив на геологічне середовище здебільшого створюють зовнішні відвали розкривних соленосних порід Домбровського кар'єру, на яких утворюються розсолостоки опадового походження, що зумовлює забруднення прилеглих територій, поверхневих і підземних вод. Процес засолення прилеглих територій і підземних вод стримується шляхом уловлювання розсолостоків розвинутою мережею кільцевих дренажних траншей та їх відкачування в акумуляуючий басейн, спорудження розсолонепроникних екранів в основі і на поверхні відвалів соляних порід [1]. Але якщо екран споруджено із природних шарів глинисто-гіпсових відкладів та суглинків, то його гідрозольованості стійкість не завжди є достатньою через наявність вікон та тріщин. Глинисто-гіпсові утворення як продукти вилуговування соленосних відкладів неоднорідні за ступенем насичення порового простору розсолами та кількістю гіпсу в їх скелеті. Тому ореоли засолення водоносного гравійно-галькового горизонту здатні поширюватися за дренажні траншеї на прилеглі території. Прискорене засолю-

вання підземних вод зумовлюють високомінералізовані води (розсоли) підтопленого кар'єрного простору.

Через такі обставини вивчення масштабів забруднення водоносного горизонту на прилеглих до Домбровського кар'єру територіях актуальне з точки зору екологічної безпеки, оскільки основним джерелом водопостачання м. Калущ є водозабір, розташований у долині р. Лимниця (у плані за зниженням рельєфу місцевості) за два кілометри від кар'єру.

З метою виявлення масштабів розповсюдження ореолів та оцінювання ступеня забруднення водоносного горизонту застосовано високочастотні індукційні зондування шляхом становлення електромагнітного поля у ближній зоні джерела (ЗСБ). Чинником, що свідчить на користь застосування ЗСБ, є підвищена внаслідок забруднення мінералізація рідкої фази в зонах розсолостоків та їх інфільтрації у водоносні горизонти, що є причиною значного підвищення електропровідності таких зон порівняно з консолідованим геосередовищем.



1 – суглинок; 2 – гравійно-галькові відклади; 3 – глинисто-гіпсові відклади; 4 – солонісні відклади

Рисунок 1 – Розрізи: геологічний (а), геоелектричний (б); криві  $S_{\tau}$ ,  $\rho_{\tau}^{\delta}$  та діаграма  $\rho$  (в) параметричного зондування свердловини № 63

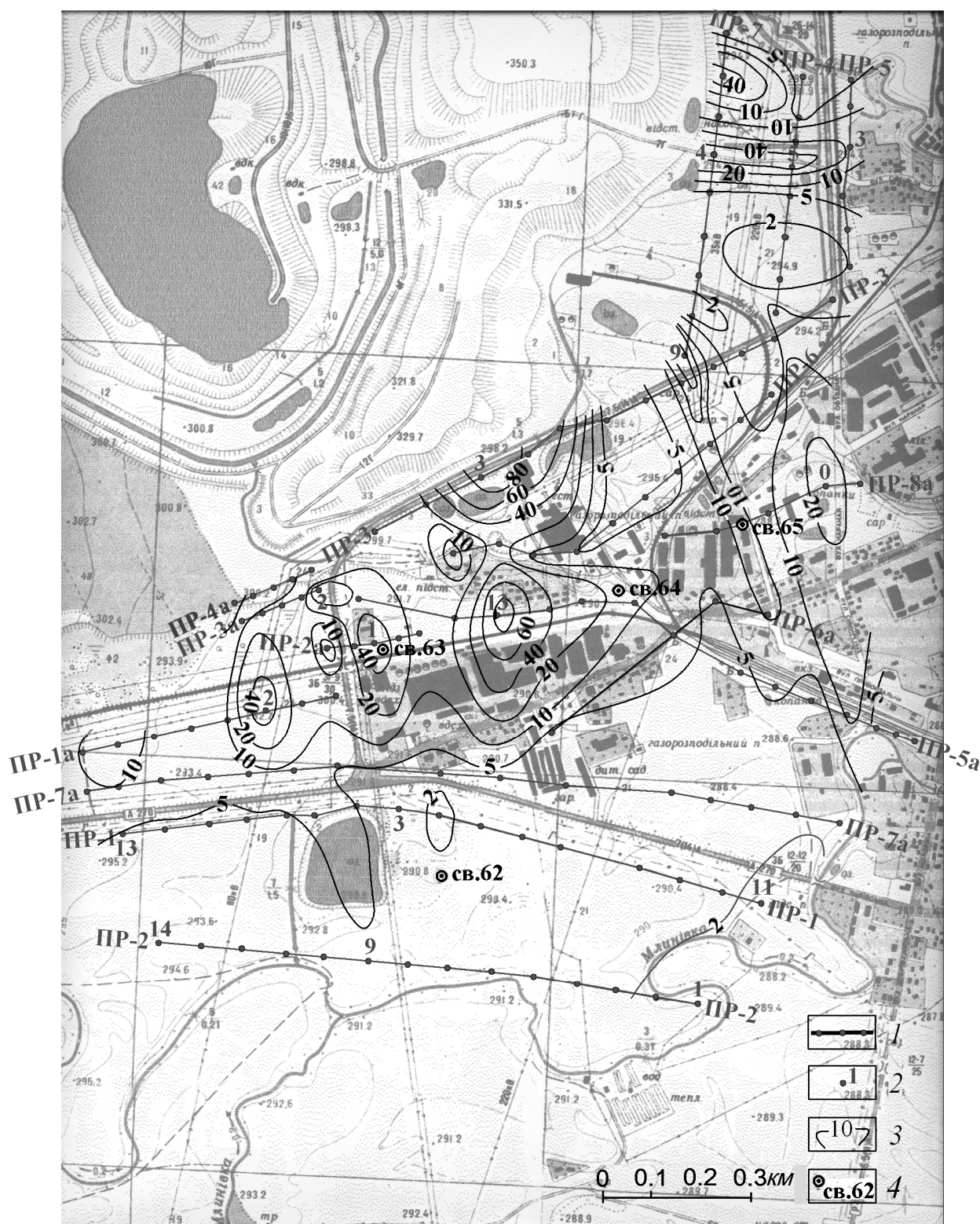
Для польових спостережень використано установку з центральною симетрією типу „контур в контурі” ( $Q-q$ ), яка, порівняно з комбінованими (наприклад, АВ –  $q$ ), забезпечує кращу роздільну здатність по вертикалі та латералі [2, 3], тобто дає змогу детально досліджувати складні геосередовища з тривимірними електричними неоднорідностями. Типорозміри установок, параметри зондувань і мережу спостережень оптимізовано на основі даних математичного та фізичного моделювання, яке у ході інтерпретації польових матеріалів застосовували також для коригування інтерпретаційних побудов. Розміри генераторного  $Q$  і вимірювального  $q$  контурів становили  $(10 \times 10) \text{ м}^2$  і  $(5 \times 5) \text{ м}^2$  відповідно. Часовий діапазон вимірювань нестационарного поля охоплював від 1,0 до 200 мкс з наростаючим у разі збільшенні часу затримки моменту виміру кроком дискретизації від 0,5 до 20 мкс, що забезпечувало достатньо високу роздільну здатність і чутливість до об’ємних змін геоелектричних параметрів середовища, зумовлених та тісно пов’язаних з розвитком процесу засолення, а також необхідну глибинність досліджень геологічного розрізу.

Трансформації індукованого поля виконувались відомим способом [4] з представленням кривих залежності поздовжньої провідності  $S_{\tau} = f(H)$  і опору  $\rho = f(H)$  від глибини ( $H$ ), за якими визначались геоелектричні параметри (елек-

тричний опір, потужність) окремих прошарків середовища. Рисунок 1 ілюструє високу роздільну здатність ЗСБ по вертикалі в конкретних геологічних обставинах і, зокрема, свідчить про можливість розчленування за геоелектричними параметрами геологічного середовища в умовах забруднення площі розсолостокками. Порівняння результатів параметричного зондування на св. 63 з геологічним розрізом свердловини свідчить про їх відповідність, а також підтверджує можливість виділення у гравійно-гальковому та глинисто-гіпсовому водоносних горизонтах низькоомних шарів підвищеної та високої мінералізації.

Методично електромагнітні дослідження прилеглої до Домбровського кар’єру території поділено на три етапи: профільні спостереження, параметричні зондування на свердловинах та періодичні спостереження по окремих профілях.

На першому етапі проводились профільні спостереження з метою виявлення і картування за рівнем аномального електромагнітного поля (ЕМП) і електропровідністю (електроопором) ореолів засолення водоносного горизонту. Для цього за рівнем сигналів у випадку затримках моменту вимірювання для часу  $t=4, 6, 12$  мкс від початку становлення побудовано площинні розподіли ЕМП, індукованого у водоносних горизонтах, виділено аномалії, що відповідають

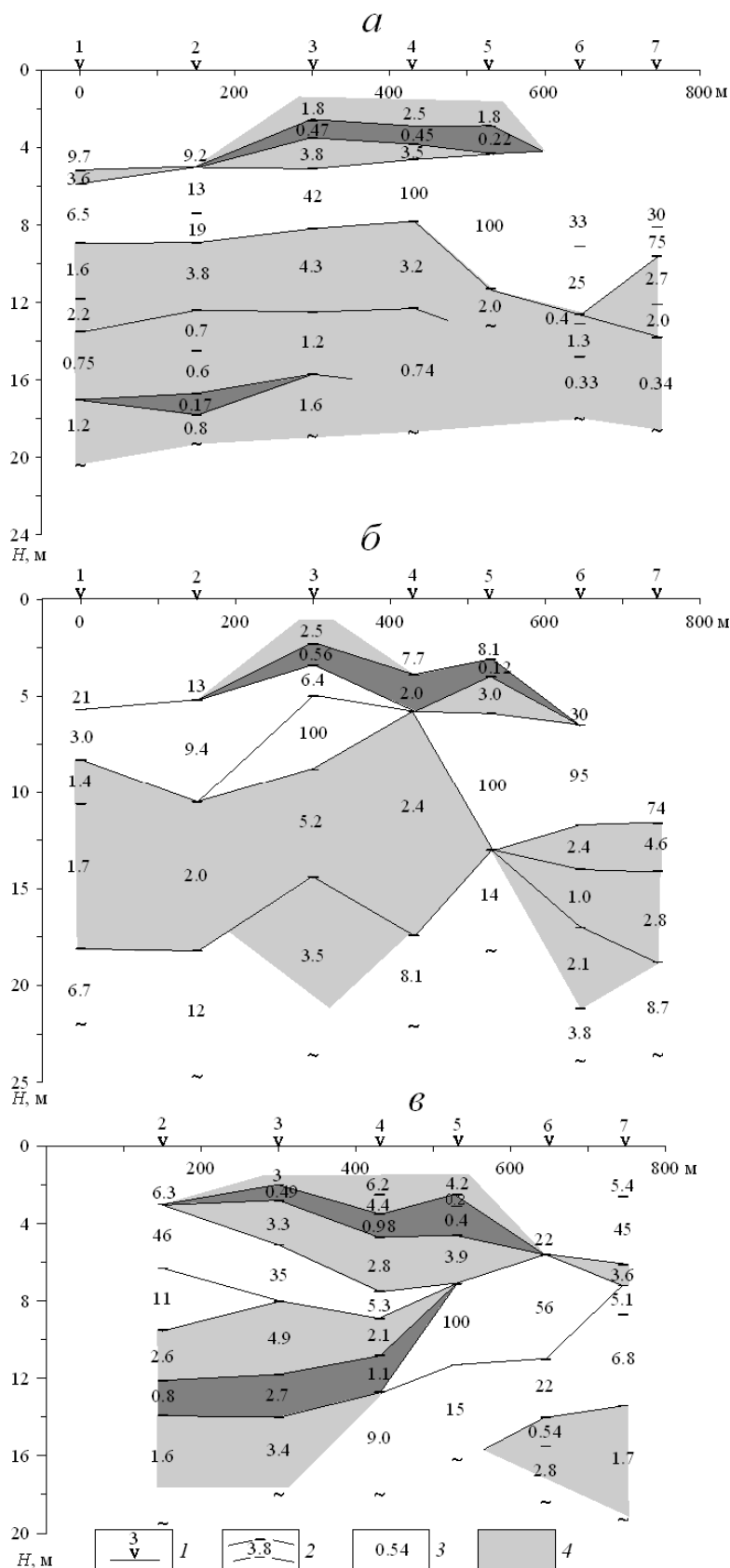


1 – профільні спостереження; 2 – пункти зондувань; 3 – ізолінії  $\frac{dB}{dt}$  для  $t=6$  мкс; 4 – свердловини

Рисунок 2 – Площинний розподіл аномалій електромагнітного поля, індукованого у гравійно-гальковому водоносному горизонті (ділянка Домбровський кар’єр – р. Малинівка)

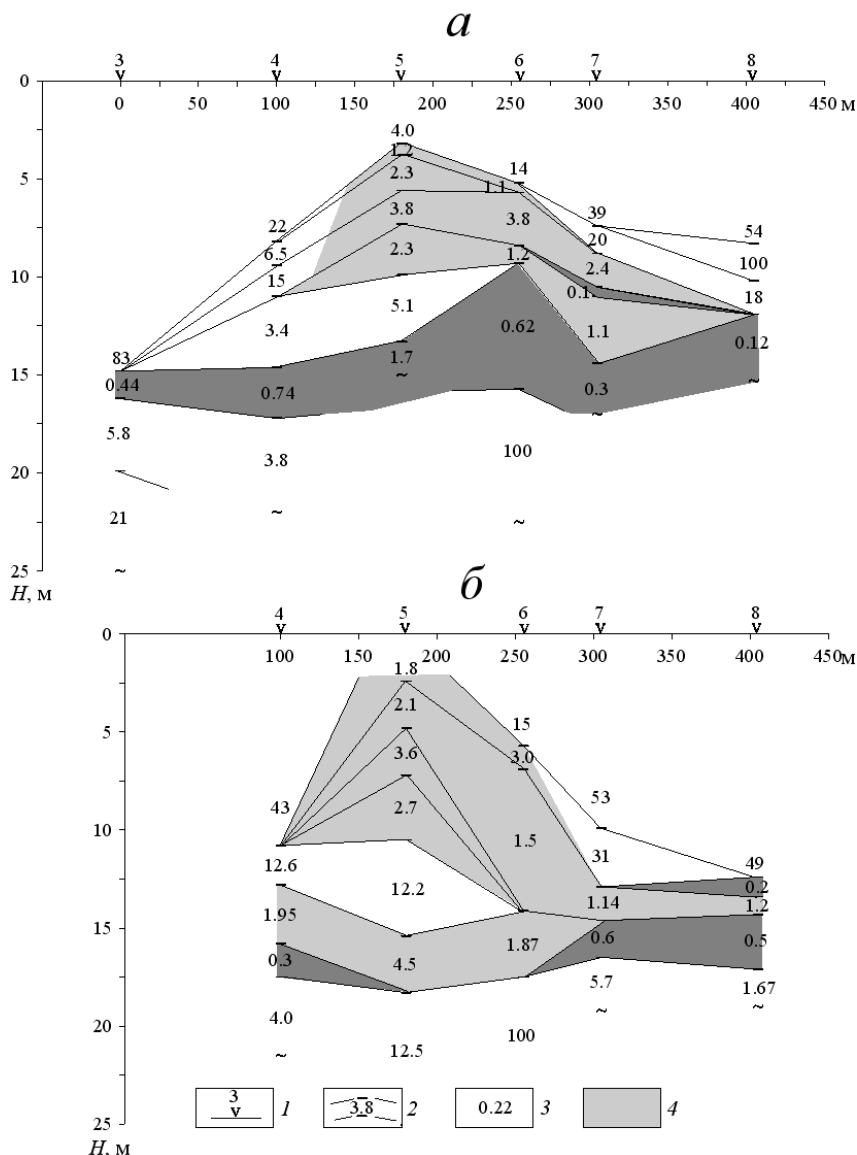
засолоненим зонам та побудовано геоелектричні розрізи, які деталізуються результатами інтерпретації окремих повних кривих ЗСБ. На розрізах простежуються латеральні і вертикальні зміни електричних опорів на глибинах до 25 м.

Для часу  $t=6$  мкс площинний розподіл аномалій ЕМП, індукованого у гравійно-гальковому горизонті, наведено на рис. 2, а геоелектричні розрізи, що відповідають найбільш забрудненим ділянкам площі, зображено на рис. 3, 4.



1 – точки зондувань і їх нумерація; 2 – геоелектричні колонки і границі середовищ; 3 – значення електричного опору; 4 – зони високої мінералізації поверхневих і підземних вод

Рисунок 3 – Геоелектричні розрізи по профілю 3 ділянки Домбровський кар'єр – р. Млинівка за даними ЗСБ першого (а), другого (б) та третього (в) циклів спостережень



1 – пункти зондувань і їх нумерація; 2 – геоелектричні колонки і границі середовищ; 3 – значення електричного опору; 4 – зони високої мінералізації поверхневих і підземних вод

**Рисунок 4 – Геоелектричні розрізи по профілю 4 ділянки Домбровський кар’єр – р.Млинівка за даними ЗСБ першого (а) та другого (б) циклів спостережень**

Ступінь забруднення характеризують рівень сигналу, електропровідність, розміри та потужність шарів, охоплених фільтраційними процесами розсолостоків. Латеральні зміни опору окремих прошарків на різних глибинах гравійно-галькового водоносного горизонту характеризують концентрацію розчинених солей, тому для їх виявлення і оконтурення використовувались індуковані на різних проміжках часу сигнали ЕМП та дані гідрохімічного аналізу вод у свердловинах. У межах дослідженої площі зафіксовано низку аномальних зон різних розмірів та електропровідності.

Велика за розмірами і провідністю аномальна зона з низьким значенням електричного опору ( $\rho=0,22-3,0$  Ом·м) окремих прошарків потужністю 1,0–4,0 м та глибиною залягання 2,0–6,0 м виділяється у центральній частині площі (ПР-3, ЗСБ №№3-5; ПР-5а, ЗСБ №13) у

районі розташування об’їзної дороги, що пролягає поблизу зовнішніх відвалів кар’єру, залізниці та автотраси, при тому значення ЕМП, індукованого у гравійно-гальковому водоносному горизонті, для фіксованого часу  $t=6$  мкс сягає 62–105 мВ/А. Від центру ділянки (ПР-5а, ЗСБ №13) аномальна зона видовжена у південно-західному напрямку уздовж залізниці, аномальні значення сигналів сягають 46–56 мВ/А, а опори прошарків змінюються у межах 0,8–3,3 Ом·м.

Менші за розмірами і амплітудою аномалії субширотного та південно-східного простягання зафіксовано у північній частині площі (ПР-7, ЗСБ №2; ПР-7-4, ЗСБ №№4-5; ПР-7, ЗСБ №9), де значення сигналу не перевищують 45–54 мВ/А, а опір прошарків змінюється в межах від 1,1 до 3,8 Ом·м.

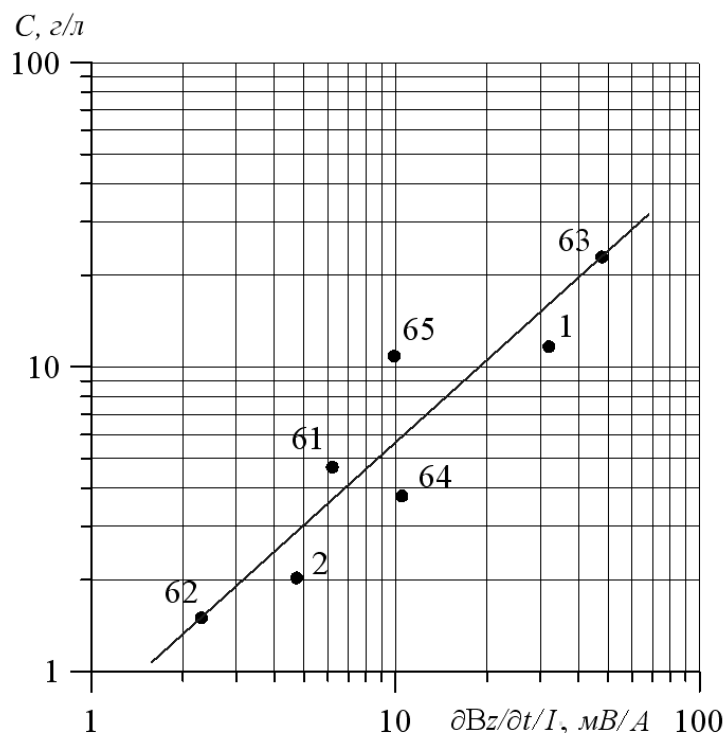


Рисунок 5 – Залежність індукованого сигналу  $\partial B_z / \partial t / I$  (мВ/А) для  $t=6$  мкс від мінералізації вод  $C$  (г/л) у гравійно-галькових відкладах

На півдні досліджуваної території між автотрасою і р. Млинівка (ПР-1, 2) рівень сигналів зменшується до 1,0–3,5 мВ/А, а опір гравійно-галькового водоносного горизонту коливається від 20 до 76 Ом·м за середнього значення 41 Ом·м. Потужність водоносного горизонту змінюється від 8 до 14 м за середньої для точок зондування у цьому районі величині 11 м.

Як видно з наведених даних, в межах розташування основних джерел забруднення (відстійники та озера накопичувачів розсолів, дренажні траншеї, відвали розкритих соленосних порід тощо) спостерігається дуже низький опір прошарків і, як правило, аномальне зростання сигналів індукованого поля. Площинний розподіл останнього якісно відображає основні контури поширення ореолів та ступінь інтенсивності забруднення водоносного горизонту.

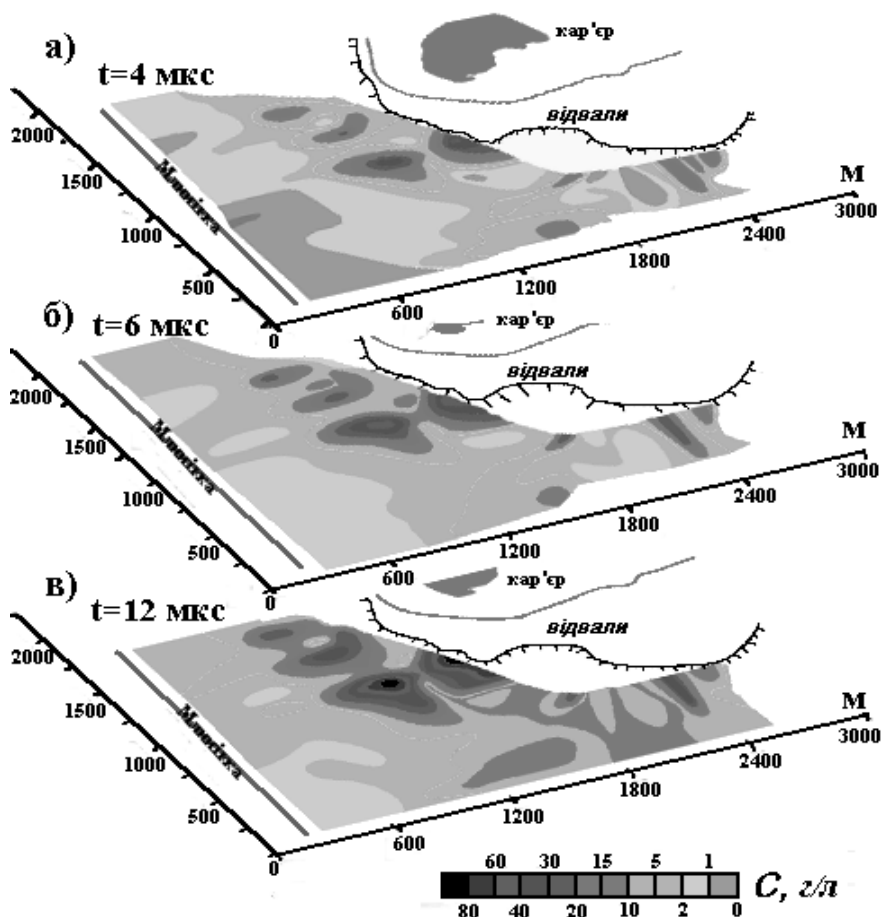
На основі отриманих даних щодо площинного розподілу аномалій ЕМП та геоелектричних розрізів Прикарпатським державним підприємством „Спецгеологорозвідка” пробурено п'ять спостережних гідрогеологічних свердловин (№№61–65), розташованих на ключових, з точки зору оцінки динаміки забруднення, ділянках. Дані гідрохімічного аналізу проб води, отримані на цих свердловинах Інститутом галургії, використовувались як еталонні під час визначення кореляційних зв'язків ЕМП із ступенем забруднення.

На другому етапі проводились параметричні спостереження на свердловинах. За сольовим складом (сумою солей) і електричними характеристиками отримано залежності індукованого сигналу на різних часових ( $t=4, 6, 12$  мкс) затримках від мінералізації вод. Залежність си-

гналу від мінералізації, для часу вимірювань  $t=6$  мкс ілюструє графік, побудований у білогарифмічному масштабі (рис. 5). Порівняння величин нормованого індукованого сигналу ( $\partial B_z / \partial t / I$ , мВ/А) зі змінами концентрації солей ( $C$ , г/л), тобто даних зондування і хімічного аналізу (суми солей) на свердловинах, засвідчує їх прямопропорційну залежність.

На цій підставі для кожного зондування визначено концентрації солей на обстежених ділянках (за глибиною та по латералі). Зокрема, за рівнем сигналу для моментів часу  $t=4$  і 6 мкс, визначено площинний розподіл концентрації солей у гравійно-гальковому водоносному горизонті (див. рис. 6 а, б), а за рівнем сигналу для моменту часу  $t=12$  мкс – у поровому розчині глинисто-гіпсових відкладів (див. рис. 6 в). Таке подання площинного розподілу концентрації солей, що чітко корелюється з аномальними зонами, індукованими у різні моменти часу сигналів ЕМП, відображає просторові характеристики ореолів засолення водоносних горизонтів. Так, на обстеженій ділянці спостерігається суттєве збільшення концентрації солей з глибиною, зумовлене високою мінералізацією порового розчину у підстиляючих низкоомних глинисто-гіпсових відкладах.

Отримані на прилеглих до Домбровського кар'єру територіях дані наочно характеризують загальну мінералізацію вод у гравійно-галькових і глинисто-гіпсових відкладах. В аномальних зонах гравійно-галькового горизонту мінералізація коливається в широких межах – від 14 (ПР-3а, ЗСБ №2) до 47 г/л (ПР-3, ЗСБ №3), а глинисто-гіпсових відкладів – від 21 до 120 г/л відповідно на цих самих пунктах зо-



**Рисунок 6 – Площинний розподіл концентрації солей (C, г/л) у гравійно-гальковому водоносному горизонті (а, б) і у поровому розчині глинисто-гіпсових відкладів (в) за даними електромагнітних зондувань (рівень сигналу  $\partial V_z/\partial I$ , мкс) на ділянці Домбровський кар'єр – р. Млинівка**

ндувань. На півдні ділянки (ПР-1 та ПР-2) за величиною загальної мінералізації води гравійно-галькового горизонту слабкомінералізовані, з коливанням концентрації солей від 0,4–0,6 (ПР-2, ЗСБ №1) до 2,9 г/л (ПР-2, ЗСБ №9) навколо середньої величини 1,8 г/л.

Динаміка засолення водоносного горизонту вивчалась у межах зон розповсюдження ореолів середньо- та високомінералізованих вод, де за окремими профілями виконано два-три цикли спостережень з часовими інтервалами в один-два роки (2005-2007 рр.). Отримані результати представлено у вигляді зіставлення геоелектричних розрізів вздовж ліній профілів (див. рис. 3, 4) та в окремих пунктах зондування, розташованих у зонах максимальної концентрації солей (рис. 7) (положення профілів та пунктів зондувань ілюструє рис. 2).

Спостереженнями динаміки геоелектричних параметрів виділяються сталі за розміщенням зони з малими та значними змінами геоелектричних параметрів (електроопір, потужність). Зміни параметрів у межах цих зон відображають процеси деградації або консолідації середовища, хоча значною мірою вони також залежать від кількості атмосферних опадів. Збільшення останніх загалом зменшує концентрацію солей у водоносному горизонті, і навпаки,

проте у випадку інтенсивного розвитку фільтраційних процесів і масопереносу солей чітко простежується його поступове засолення.

Динаміку змін геоелектричних параметрів гравійно-галькових відкладів ілюструють результати кількісної інтерпретації окремих зондувань, виконаних в найбільш аномальних зонах, де ґрунтові води високомінералізовані (рис. 7). У верхній частині геоелектричних розрізів до глибин 5,5–6,4 м (ЗСБ №13) та 8,0–10,5 м (ЗСБ №3 та №5) за результатами обробки даних ЗСБ виділяються від трьох до чотирьох горизонтів різного опору, де за повторними циклами зондувань спостерігаються зміни електричного опору, а також зміщення інтерпретаційних границь поділу середовища, зумовлені динамікою процесів засолення. Як видно з представлених даних, найбільші зміни відбуваються на малих глибинах (1,6–3,2 м) на межі суглинків та гравійно-галькових відкладів. При тому глибини геоелектричних горизонтів змінюються на 25–30%, а значення електричного опору – на 40–200%.

Значно менші відносні зміни положення геоелектричних границь засоленого горизонту відбуваються на більших глибинах у прошарках гравійно-галькових відкладів та їх границях розділу з суглинками, хоча зміна опору за час

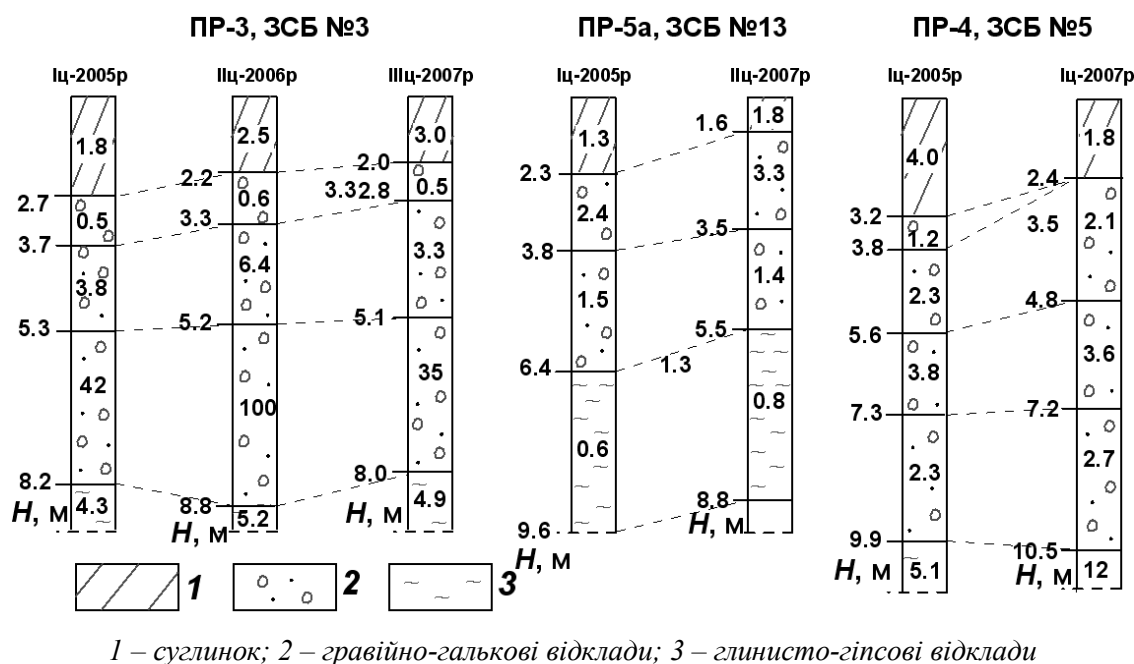


Рисунок 7 – Динаміка змін геоелектричних параметрів розрізів в епіцентрі аномальних зон

спостережень (2005–2007 рр.) сягала 40% (ЗСБ №13), у той час як опір зростав від 2,4 до 3,3 Ом·м.

Таким чином, періодичні спостереження методом ЗСБ за зміною параметрів (стану) приповерхневого геосередовища у часі дають змогу перейти до побудови динамічних моделей та прогнозування розвитку процесу засолення гравійно-галькового водоносного горизонту в часі і просторі.

На основі фактичного матеріалу результатів досліджень електрофізичних характеристик, зокрема геоелектричних параметрів розрізу середовища, площинних розподілів індукованих сигналів ЕМП та концентрації солей у гравійно-гальковому водоносному горизонті, визначено контури поширення ореолів та ступінь засолення розсолостокami опадового походження від зовнішніх відвалів розкривних соленосних порід Домбровського калійного кар'єру. Це свідчить про високу геологічну інформативність та ефективність індукційних електромагнітних зондувань в оцінках стану і динаміки змін забруднення середовища відходами калійного виробництва, а також доцільність їх застосування в комплексі гідрогеологічних методів досліджень в системі моніторингу, спрямованих на вирішення екологічних проблем.

Дослідженнями, спрямованими на вирішення проблеми забруднення геологічного середовища відходами калійного виробництва, виявлено зони і визначено контури поширення ореолів та ступінь засолення гравійно-галькового горизонту розсолостокami осадового походження від зовнішніх відвалів розкривних соленосних порід діючого Домбровського кар'єру. У межах досліджуваних площ на основі залежності нормованих токів сигналів від концентрації солей та геоелектричних параметрів окремих прошарків виділено ділянки розпо-

всюдження прісних, слабко- і високомінералізованих вод, а періодичними спостереженнями простежується динаміка засолення водоносного горизонту.

Отже, отримані результати вказують на високу геологічну інформативність та ефективність індукційних електромагнітних зондувань в оцінках стану і динаміки змін ґрунтів дамби хвостосховища та забруднення середовища відходами калійного виробництва, а також доцільність їх застосування в комплексі гідрогеологічних методів досліджень в системі моніторингу, спрямованих на вирішення екологічних проблем.

### Література

- 1 Гаркушин П.К. Техногенез і охорона навколишнього середовища при розробці калійних родовищ Передкарпаття / П. К. Гаркушин // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2001. – №2. – С.48–54.
- 2 Дешиця С.А. Модельні засоби синтезу електромагнітних образів неоднорідних геосередовищ / С.А.Дешиця – Л. КВ ІФФ НАНУ, 1993. – 36 с. – (Препринт / АН України, ІППММ; Львів, 1993. – 16).
- 3 Дешиця С.А. Комплексні засоби дослідження геосередовищ нестаціонарними електромагнітними полями / С. А. Дешиця, В. І. Шамотко, О. А. Негазова // Геофізика. – 2002. – Т. 8. – С. 18-24.
- 4 Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка / Сидоров В.А – М., 1985. – 185 с.

Стаття поступила в редакційну колегію  
10.11.08  
Рекомендована до друку професором  
О. М. Адаменком